



TIETO- JA SÄHKÖTEKNIIKAN TIEDEKUNTA
ELEKTRONIIKAN JA TIETOLIIKENNETEKNIIKAN TUTKINTO-OHJELMA

DIPLOMITYÖ

RF-ANTUROINTIJÄRJESTELMÄN INTEGROINTI KANNETTAVAKSI LAITTEEKSI

Tekijä	Johan-Antti Wahlsten
Valvoja	Jari Hannu
Toinen tarkastaja	Jarkko Tolvanen
Työn tekninen ohjaaja	Joni Kilpijärvi

Kesäkuu 2021

Wahlsten J-A. (2021) RF-anturointijärjestelmän integrointi kannettavaksi laitteeksi.
Oulun yliopisto, tieto- ja sähkötekniikan tiedekunta, sähkötekniikan tutkinto-ohjelma.
Diplomityö, 52 s.

TIIVISTELMÄ

Diplomityössä suunniteltiin ja toteutettiin kehon nestetasapainon mittaukseen tarkoitettu sulautetun kannettavan laitteen prototyyppi, joka käyttää RF-elektroniikkaa. Laitteen lähtökohtana oli Oulun yliopiston Mikroelektroniikan tutkimusyksikössä suunniteltu ja valmistettu complementary split ring –tyyppinen resonaattori ja siihen liitetty mittaussytkentä. Mittaussytkentä koostui D/A-muuntimesta, operaatiovahvistimesta, jänniteohjattusta oskillaattorista, resonaattorista, suuntakytkimestä ja RF-ilmaisimesta.

Suunnittelu jakautui piirilevysuunnitteluun ja ohjelmistosuunnitteluun. Laitteelle tehtiin vaatimusmäärittely, jonka perusteella piirilevy ja ohjelmisto suunniteltiin. Vaatimusmäärittelyssä huomioitiin laitteen tavoiteltu pieni koko ja keveys sekä tiedonsiirtovaatimus Bluetooth-yhteydellä mobiilisovellukseen. Vaatimusmäärittelyn asettamien reunaehtojen perusteella piirilevyille valittiin komponentit, joita käytettiin jännitelähteiden ja mittaussytkennän toteuttamiseen. Mikrokontrolleriksi valittiin Texas Instrumentsin CC2640R2F, joka tukee pienitehoisiin kannettaviin laitteisiin tarkoitettua Bluetooth Low Energy –likiverkkotekniikkaa. Bluetooth-antenniksi valikoitiin piirilevyn kuparointia käyttävää 2,4 GHz invertoitua F-antennia. Piirilevyn käyttöjännitetasoiksi päätettiin 3,3 V, 5 V ja 12 V mittaussytkentäkomponenttien jännitevaatimusten mukaan. Piirilevysuunnittelussa käytettiin Autodesk Eagle –suunnitteluohjelmaa, jolla piirrettiin sekä piirikaavio että piirilevy.

Laitteelle tehtiin testaussuunnitelma, jonka mukaan tuotannosta tulleiden piirilevyjen toiminta testattiin moduuleittain. Testauksia ja ohjelmiston toteutusta tehtiin osin rinnakkaisina prosesseina, koska osa komponenteista vaati ohjaussignaaleja toimiakseen. Esimerkiksi jänniteohjattua oskillaattoria ohjaavan D/A-muuntimen lähtöjännite määriteltiin I²C-väylän kautta. Ohjelmiston toteutuksessa käytettiin apuna mikrokontrollerisarjan SDK-pakettia ja laitevalmistajan esimerkkiohjelmia. Prototyypin testauksen ja ohjelmistototeutuksen aikana esiin tulleet suunnitteluvirheet korjattiin ja mittaussytkentäkomponentit testattiin kokonaisuudessaan.

Avainsanat: sulautettu järjestelmä, RF-mittaus, integrointi, prototyyppi

Wahlsten J-A. (2021) Integration of RF sensing system into wearable device. University of Oulu, Faculty of Information Technology and Electrical Engineering, Degree Programme in Electrical Engineering. Master's Thesis, 52 p.

ABSTRACT

During the master thesis work a prototype of a portable device measuring body fluid balance was designed and manufactured. The prototype utilizes RF sensing electronics. The basis for the work was a complementary split ring resonator designed and manufactured in University of Oulu Microelectronics Research Unit. The existing design included also other measurement components. The measurement module consisted of a DA converter, operation amplifier, voltage-controlled oscillator, resonator, directional switch and RF detector.

The design work was divided into two phases: PCB design and software design. A specification for the device was made. The specification included preferred small size, light weight of the device and the ability to transmit data over Bluetooth connection to a mobile device. According to the conditions set by the specification, the components for voltage supplies and measuring were chosen. The microcontroller unit selected was CC2640R2F manufactured by Texas Instruments which supports Bluetooth Low Energy WPAN technology designed for low-power portable devices. The Bluetooth antenna used was a 2.4 GHz microstrip inverted F-antenna which is manufactured as part of the PCB. The supply voltages were selected according to the requirements of the measurement components: 3.3 V, 5 V and 12 V. Autodesk Eagle software was used for drawing the schematics and the layout of the PCB.

A testing plan for the device was made and the PCBs which arrived from production were tested module by module. Testing and software programming were made partially as parallel processes because part of the components required control signals to be able to function. For example, the output voltage of the DA converter controlling the voltage-controlled oscillator was set through I²C bus. The SDK of the microcontroller series and example programs available from TI were used for programming. Design flaws found during the testing and programming phases were fixed and the measuring system was tested completely.

Key words: embedded system, RF-measurement, integration, prototype

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

SISÄLLYSLUETTELO

ALKULAUSE

LYHENTEIDEN JA MERKKIEN SELITYKSET

1	JOHDANTO	7
2	MITTAUSJÄRJESTELMÄN INTEGROINTI PIIRILEVYLLE	8
	2.1 RF-mittausjärjestelmän rakenne ja toiminta.....	8
	2.2 Lähtökohdat ja vaatimukset integroinnille	10
3	PIIRILEVYN SUUNNITTELU	12
	3.1 Suunnitteluvuo.....	12
	3.1.1 Aktiivikomponenttien valinta	13
	3.1.2 Passiivikomponenttien valinta	14
	3.2 Työkalut.....	19
	3.2.1 Piirikaavion piirtäminen	20
	3.2.2 Komponenttien sijoittelu piirilevylle.....	25
	3.2.3 Johtimien ja läpivientien piirtäminen	26
	3.3 Piirilevyjen tilaaminen	28
4	LAITEOHJELMISTON TOTEUTUS.....	30
	4.1 Laiteohjelmiston vaatimusmäärittely	30
	4.2 Kehitysympäristö ja debugger	30
5	LAITTEEN TESTAUS JA KÄYTTÖÖNOTTO	33
	5.1 Moduulien testaus, ohjaus ja mittaustulokset.....	34
	5.2 Bluetooth Low Energy	39
	5.3 Kehitystyössä havaitut poikkeamat	41
6	POHDINTA	43
7	YHTEENVETO	44
8	LÄHDELUETTELO	46
9	LIITELUETTELO	48

ALKULAUSE

Diplomityön tavoitteena oli integroida Oulun yliopiston Mikroelektroniikan tutkimusyksikössä suunniteltu RF-mittausjärjestelmä kannettavaksi laitteeksi. Diplomityössä suunniteltiin ja toteutettiin mittalaitteen prototyyppi. Työ tehtiin Oulun yliopiston Mikroelektroniikan tutkimusyksikössä PoC-hankerahoituksella.

Kiitokset esitän Jari Hannulle tuesta ja ohjauksesta diplomityöprosessin aikana sekä mahdollisuudesta tehdä diplomityö Mikroelektroniikan tutkimusyksikössä. Joni Kilpijärvelle kiitokset tutkimustyöstä ja ideasta nestetasapainon mittaukseen. Kiitokset myös työn toiselle tarkastajalle Jarkko Tolvaselle.

Oulussa 1.6.2021

Johan-Antti Wahlsten

LYHENTEIDEN JA MERKKIEN SELITYKSET

A/D	analogisesta digitaaliseksi (Analog-to-Digital)
AUXIO	erillinen tulo/lähtö (Auxiliary I/O)
BLE	matalaenergiainen Bluetooth (Bluetooth Low Energy)
BOM	osaluettelo (Bill of Materials)
CAD	tietokoneavusteinen suunnittelu (Computer Aided Design)
CAM	tietokoneavusteinen koneistus (Computer Aided Machining)
CPL	kytketty portti (Coupled)
CSRR	komplementaarinen halkaistu rengas -tyyppinen resonaattori (Complementary Split Ring Resonator)
CSV	pilkulla erotetut arvot (Comma Separated Values)
D/A	digitaalisesta analogiseksi (Digital-to-Analog)
DC	tasavirta (Direct Current)
DNM	jätetään kytkemättä (Do Not Mount)
DRC	suunnittelusääntöjen tarkastus (Design Rule Check)
EDA	elektroniikkasuunnittelun automatisointi (Electronic Design Automation)
ERC	sähköisten sääntöjen tarkastus (Electrical Rule Check)
GND	maa (Ground)
IC	integroitu piiri (Integrated Circuit)
I ² C	kaksisuuntainen ohjaus- ja tiedonsiirtoväylä (Inter-Integrated Circuit)
JTAG	laitteiston ja ohjelmiston testaukseen käytettävä porttistandardi (Joint Test Action Group)
LED	valoa emittoiva diodi (Light Emitting Diode)
Li-Ion	litiumioni
Li-Po	litiumpolymeeri
MCU	mikrokontrolleri (Microcontroller Unit)
NMOS	N-kanavainen MOS-transistori
PMOS	P-kanavainen MOS-transistori
RC	vastus-kondensaattorikytkentä (Resistor-Capacitor)
RF	radiotaajuus (Radio Frequency)
RTOS	reaaliaikakäyttöjärjestelmä (Real-Time Operating System)
SCL	sarjaväylän kellolinja (Serial Clock Line)
SDA	sarjaväylän datalinja (Serial Data Line)
SDK	ohjelmistonkehityspaketti (Software Development Kit)
SMA	RF-liitin koaksiaalikaapeliin (SubMiniature version A)
TDI	testidata sisään (Test Data In)
TDO	testidata ulos (Test Data Out)
THRU	läpipäästävä portti (Through)
UART	universaali asyknoinen lähetin-vastaanotin (Universal Asynchronous Receiver Transmitter)
USB	universaali sarjaväylä (Universal Serial Bus)
VCO	jänniteohjattu oskillaattori (Voltage Controlled Oscillator)

1 JOHDANTO

Terveysteknologisten sovellusten käyttö on viime vuosien kuluessa kasvanut. Aiheeseen liittyviä tutkimuksia tehdään, hyvinvointi- ja terveysteknologian osajia koulutetaan ja uusia laitteita tuodaan markkinoille. Terveysteknologisten sovellusten käyttöönotto on tullut käyttäjille helpommaksi ja arkipäiväisemmäksi mm. älypuhelinsovellusten myötä. Sovelluksissa hyödynnetään erilaisia anturointitekniikoita.

Ihmiskehon nestetasapainon säätely on elintärkeä toiminto. Nestetasapainon aleneminen voi aiheuttaa terveydellisiä ongelmia etenkin lapsilla ja ikäihmisillä. Vaikutukset ovat sekä fyysisiä että psyykkisiä. Kehon nestemäärä vaihtelee tyypillisesti 55 ja 75 painoprosentin välillä. Vettä sisältävät niin solut, kudokset kuin verenkierto. Kehosta nestettä poistuu virtsaamisen, iholla tapahtuvan hikoilun ja haihtumisen, hengityksen, syljen ja ruoansulatuksen kautta. Poistuvan nesteen tilalle vettä saadaan ruoasta ja juomasta. [1]

Nestehukka on tila, jossa elimistö kuivuu veden riittämättömän saannin tai liiallisen menetyksen seurauksena [2]. Nestettä haihtuu iholta erityisesti helteellä, jolloin kehon on haihdutettava enemmän vettä estääkseen ruumiinlämpöä nousemasta [L03, 73]. Nestetasapainon seurantaa edellytetään potilailta, joilla on munuaisten vajaatoiminta, neste-elektrolyyttitasapainohäiriö tai jotka kärsivät vakavasta oksentamisesta tai ripulista [4]. Lisäksi esimerkiksi urheilijat voisivat hyötyä nestetasapainon seurannasta.

Markkinoilla on useita erityyppisiä kannettavia ja puettavia laitteita ihmiskehon mittaukseen. Kuluttajille tuttuja ovat erilaiset sykemittarit, aktiivisuusrannekkeet ja -sormukset. Myös veren insuliinipitoisuutta mitataan nykyisin langattomilla antureilla. Kuitenkaan käyttäjän mukana kulkevia automaattisia nestetasapainomittareita ei vielä ole myynnissä, vaikka teknologisia esteitä laitteiden kehittämiselle ei ole.

Diplomityön tavoitteena on suunnitella ja toteuttaa prototyyppi radiotaajuista mittausta käyttävästä kannettavasta laitteesta kehon nestetasapainon mittaukseen. Nesteen määrää kudoksessa voidaan mitata mikroaaltoalueella, jolle on kehitetty useita erilaisia anturityyppejä [5]. Työssä käytetään Oulun yliopiston Mikroelektroniikan tutkimusyksikössä suunniteltua ja toteutettua resonaattoria, josta heijastuva signaali mitataan [1]. Heijastuvan signaalin resonanssitaajuudesta ja tehotasosta voidaan päätellä kehon nestetasapainon tila. Signaalin heijastuma mitataan ja lähetetään langattomasti mittausdatan käsittelevään ja tuloksen esittävään laitteeseen, joka voi olla esimerkiksi älypuhelin. Kun data käsitellään älypuhelimella, sitä voidaan käyttää mittausjärjestelmän opettamiseen ja sopeuttamiseen käyttäjän kehon yksilöllisiin ominaisuuksiin soveltuvaksi.

2 MITTAUSJÄRJESTELMÄN INTEGROINTI PIIRILEVYLLE

Työssä toteutetun mittausjärjestelmän ydin on RF-mittausmoduuli, jolla mitataan kudokseen sitoutuneen nesteen määrää. Mittaus toteutetaan 4,6 GHz - 6,8 GHz taajuusalueella complementary split ring -tyyppistä resonaattoria käyttäen ja mittauksena saadaan kudoksen RF-signaalista absorboima teho. [1]

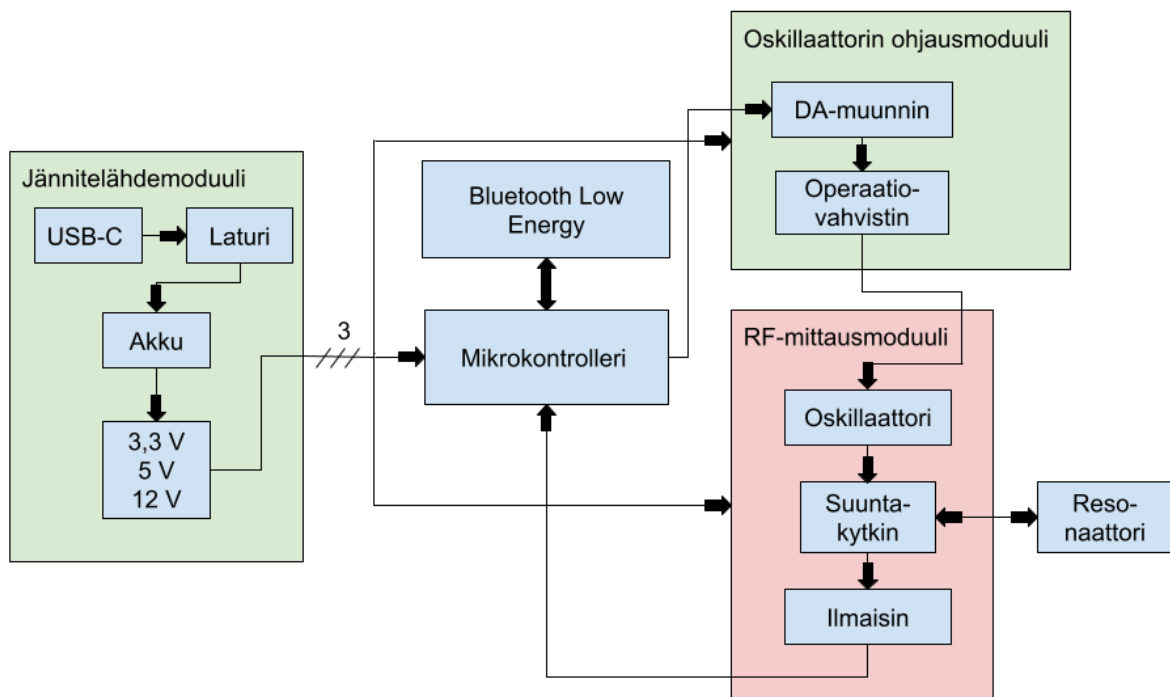
Mittausjärjestelmän prototyypin on tarkoitus pyyhkäistä mittauksessa käytettävän taajuusalueen läpi ja ilmaista kussakin mittauspisteessä resonaattorista takaisin heijastuva teho. Mittaus tehdään ranteessa pidettävällä mittalaitteella. Teholukemat tallennetaan laitteen käyttömuistiin ja lähetetään kuvan 1 mukaisesti Bluetooth-yhteydellä eteenpäin esimerkiksi mobiililaitteelle.



Kuva 1. Ranteessa pidettävä mittalaite lähettää mittausdatan langattomasti mobiililaitteelle.

2.1 RF-mittausjärjestelmän rakenne ja toiminta

Mittausjärjestelmän lohkokaavio on esitetty kuvassa 2. Järjestelmä sisältää mikrokontrollerin, Bluetooth-antennin, jännitelähteet, oskillaattorin ohjauksen ja RF-mittausmoduulin. Mittausjärjestelmää ohjataan ja mittauksien tulokset luetaan Bluetooth-yhteyden avulla.

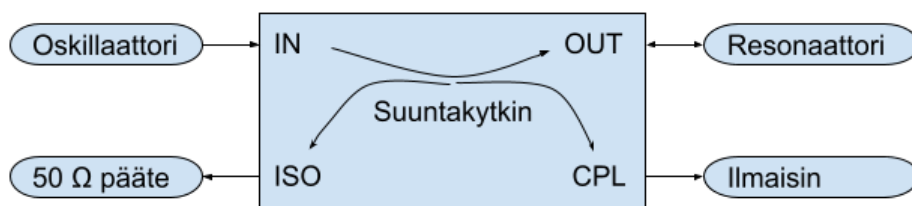


Kuva 2. Lohkokaavio.

Jännitelähdemoduuli koostuu USB-C-liitimestä, latauspiiristä, akusta ja jännitelähteistä. USB-C-liitintä käytetään tässä sovelluksessa ainoastaan akun lataukseen. Latauspiiri lataa akun USB-väylän 5 V jännitteestä ja ilmaisee latauksen olevan käynnissä. Akkuna käytetään soveltuvaa 3,7 V litiumioni- tai litumpolymeeriakkua, jossa on sisäänrakennettuna oikosulku-, alijännite- ja ylijännitesuojaukset. Akkujännitteestä muunnetaan kolme DC-käyttöjännitetasoa: 3,3 V, 5 V ja 12 V. Mikrokontrolleri, D/A-muunnin ja oskillaattori käyttävät 3,3 V jännitettä. 5 V tarvitaan ilmaisimelle ja 12 V D/A-muuntimen jälkeiselle operaatiovahvistimelle.

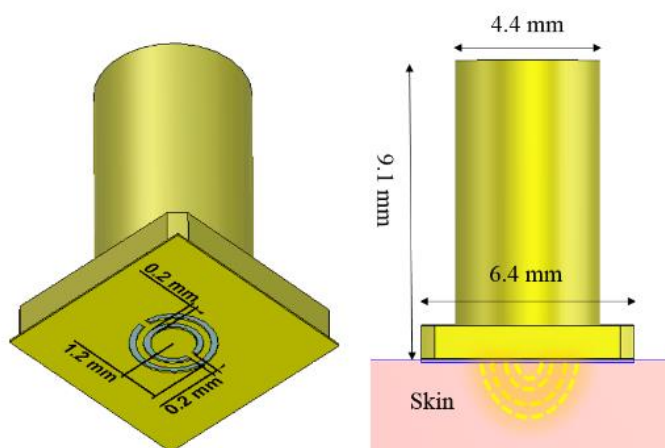
Mikrokontrolleri ohjaa mittauksitahtumaa D/A-muuntimella, joka muuntaa digitaalisen tavun DC-jännitteeksi jänniteohjatun oskillaattorin ohjaustuloon. Välissä oleva operaatiovahvistin nostaa D/A-muuntimen tuottaman jännitteen oskillaattorin tarvitsemalle 0 V - 10 V jännitetasolle. Mikrokontrolleri huolehtii myös mittauksien lukemisesta RF-mittausmoduulilta sekä Bluetooth-yhteydestä.

RF-mittausmoduuli sisältää oskillaattorin, suuntakytkimen, ilmaisimen ja anturina toimivan resonaattorin. Oskillaattori tuottaa mittaukseen tarvittavan 4,6 GHz - 6,8 GHz signaalin. Signaali kulkee kuvassa 3 olevan suuntakytkimen läpi, jolloin osa siitä kytkeytyy ilmaisimelle. Resonaattorilta takaisin heijastuva signaali vahvistaa kytkeytyvän signaalin amplitudia, jonka ilmaisimpiiri muuttaa DC-jännitteeksi. Suuntakytkimen neljänteen porttiin kytketään 50 ohmin päätevastus, joka toimii sovitteena ja estää ylimääräiset signaalin heijastumat.



Kuva 3. Suuntakytkin.

Anturina käytetään complementary split ring -tyyppistä (CSRR) resonaattoria, joka on esitetty kuvassa 4 [1]. Resonaattorin kuvio on viritetty käytettävälle taajuuksalueelle. Tällä taajuuksalueella sähkömagneettinen kenttä muodostaa simuloidussa ympäristössä mittauspisteen alle yhden millimetrin syvyyteen iholle. Mittauspisteen resonanssitaajuus vaihtelee väliaineen kosteudesta riippuen, jolloin kosteus saadaan selville resonanssitaajuutta mittaamalla. Laboratorio-olosuhteissa ihokudoksen kaltaista väliainetta käytettäessä resonanssitaajuudet ovat olleet välillä 5,3 GHz - 5,9 GHz nesteytetystä kuivaan ihoon. [1]



Kuva 4. CSRR-anturi.

2.2 Lähtökohdat ja vaatimukset integroinnille

Lähtökohtana työlle on J. Kilpijärven ym. artikkeliin [1] perustuva erillisillä moduuleilla toteutettu mittausjärjestelmän prototyyppi. Prototyyppi koostuu Arduino Micro -kehitysalustasta, Bluetooth-moduulista, oskillaattorin ohjauksesta, oskillaattorista ja ilmaisimesta. Oskillaattorina käytössä on Analog Devices:n HMC431LP4E ja ilmaisimena saman toimittajan AD8318. Oskillaattoria ohjataan Texas Instrumentsin DAC5571-D/A-muuntimella ja LMC7101-operaatiovahvistimella. D/A-muuntimen ohjaukseen tarvitaan I²C-sarjaväylä.

Uudessa prototyyppivaiheessa suunniteltiin ja toteutettiin puettava laite, joka siirtää mittausdatan langattomasti vastaanottimeen, esim. mobiililaitteeseen. Mittausjärjestelmä perustuu radiotaajuiseen mittaukseen, joten RF-signaalit on kyettävä pitämään erillään DC-signaaleista ja RF-signaalien polut on pidettävä mahdollisimman lyhyinä. Tämä oli otettava huomioon piirilevyä suunniteltaessa komponenttien ja maatasen sijoittelussa. Laitteen on oltava puettavissa esimerkiksi ranteen ympärille, joten sen koon on oltava pieni. Toisaalta taas

ensimmäisen integroidun prototyypin jännitearvoja tulee voida mitata yleisesti käytössä olevin laboratoriomittalaittein.

Koska prototyyppiä voidaan käyttää ranteessa, sen akun tulee olla tarpeeksi kevyt, mutta kapasiteetiltaan riittävä. Energiankulutuksen pienentämiseksi mittaus tulee voida kytkeä vastaanottimesta päälle ja pois Bluetooth-yhteydellä. Vaatimusmäärittely on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Vaatimusmäärittely.

Ominaisuus	Arvo
toiminto	nestetasapainon mittaus
koko	noin 100 x 50 x 30 mm
massa	mahdollisimman kevyt
jännitelähde	akku + USB-lataus
tiedonsiirto	Bluetooth
RF-mittausalue	4,6 GHz - 6,8 GHz
D/A-muuntimen ohjaus	I ² C-väylä
mittaustuloksen luenta	analoginen signaali
jännitetasot	3,3 V; 5 V; 12 V
I/O-pinnien määrä	vähintään 10

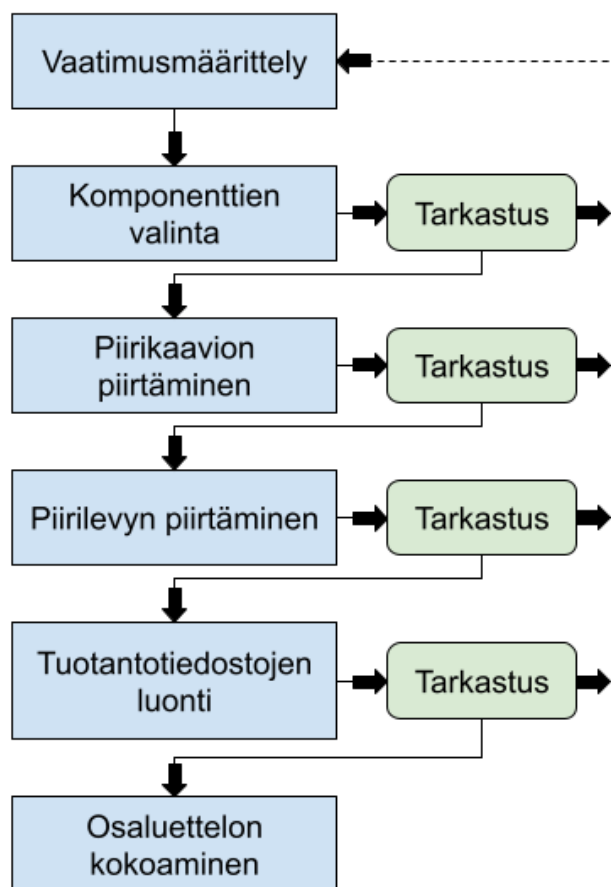
3 PIIRILEVYN SUUNNITTELU

Sulautetun järjestelmän piirilevyn suunnittelu on monivaiheinen ja asiantuntemusta vaativa prosessi. Suunnittelijalla on usein lähtötilanteessa tyhjä työpöytä ja tilaajan toimittama tai yhteistyössä tehty vaatimusmäärittely. Suunnitteluprosessiin kuuluu datalehtien lukemista, komponenttien arvojen laskentaa ja yhteensovittamista sekä CAD-ohjelmistolla piirtämistä.

Yksinkertaisimmillaan piirilevy voi koostua muutamasta komponentista. Levyn kompleksisuus lisääntyy ja suunnittelussa huomioon otettavien asioiden määrä kasvaa, kun levyille lisätään eri jännitetasoja ja korkeataajuisia signaaleja, jotka eivät saa häiritä toisiaan.

3.1 Suunnitteluvuo

Piirilevyn suunnitteluprosessi voidaan jakaa osiin, joita ovat: vaatimusmäärittelyyn soveltuvien komponenttien etsiminen ja valitseminen, komponenttien CAD-mallien lataaminen ja tarvittaessa piirtäminen, piirikaavion piirtäminen, komponenttien sijoittelu, johtimien ja läpivientien piirtäminen, piirilevyn tuotantotiedostojen luonti sekä osaluettelon kokoaminen. Suunnitteluprosessin jokaiseen vaiheeseen kuuluu tehdyn työn tarkastus, jolla pyritään minimoimaan prosessin seuraavissa vaiheissa havaitut virheet. Suunnitteluprosessi on esitetty kuvassa 4.



Kuva 4. Suunnitteluvuo.

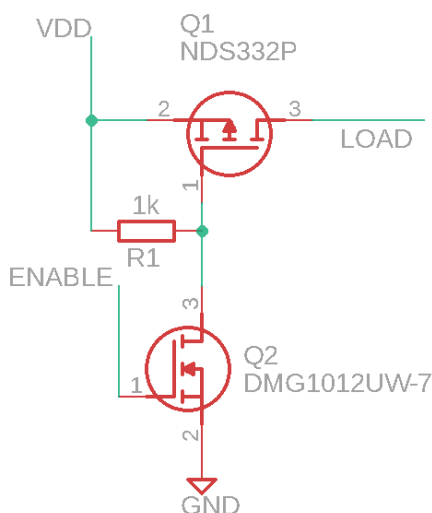
Suunnittelun lähtökohtana on siis vaatimusmäärittely, jossa kerrotaan suunnittelulle asetetut reunaehdot. Tässä kohtaa tärkeimmät vaatimukset ovat piirilevyn pieni koko ja mitattavuus. Lisäksi aiemmassa prototyyppivaiheessa valitut komponentit määrittelevät muilta komponenteilta vaadittavia ominaisuuksia. Piirilevyn pieni koko edellyttää käytettäväksi mahdollisimman paljon pintaliitoskomponentteja.

3.1.1 Aktiivikomponenttien valinta

Komponenttien valinnassa suurena apuna ovat komponenttitoimittajien hakukoneet, joilla voidaan etsiä sopivia komponentteja tarvittavat hakuparametrit määrittelemällä. Ensimmäisenä valittavana komponenttina oli mikrokontrolleri. Tiedossa oli, että joissain mikrokontrollereissa on Bluetooth-toiminnallisuus sisäänrakennettuna, joten haku kohdistui niihin. Hakukoneen tuloksista poimittiin Texas Instrumentsin SimpleLink CC2640-sarja, johon tutustuttiin tarkemmin valmistajan verkkosivuston ja datalehtien avulla. Käytettäväksi mikrokontrolleriksi valikoitui lopulta CC2640R2F. Se täytti vaatimukset I/O-pinnien määrästä ja mittaussignaalin käsittelyssä tarvittavasta A/D-muuntimesta. Lisäksi siihen on olemassa kattava ohjelmistokehityspaketti (SDK), joka kattaa Bluetooth Low Energy (BLE) –protokollan käytön. CC2640R2F soveltui käytettäväksi myös käyttöjännitealueensa puolesta, koska se toimii 1,8 V - 3,8 V jännitteellä [6]. SimpleLink-sarjassa on mahdollista käyttää TI-RTOS-reaalitietokonejärjestelmää, joka valmiine ajureineen nopeuttaa ohjelmointityötä [7].

Tässä vaiheessa oli selvillä tarvittavat käyttöjännitetasot: 3,3 V, 5 V ja 12 V, joten voitiin siirtyä jännitelähdemoduulin suunnitteluun. Akuksi valikoitiin 3,7 V litium-polymeeriakku niiden helpon saatavuuden ja keveyden vuoksi. Tämä tarkoittaa samalla sitä, että jännitelähteiden on toimittava tulojännitteen vaihdellessa puretun akun 2,75 V ja täyteen ladatun akun 4,2 V välillä [8]. 3,3 V DC-DC-muuntimeksi valittiin Micrel:n MIC23050, jonka tulojännitealue on 2,7 V - 5,5 V [9]. Vastaavalla tulojännitealueella toimiviksi muuntimiksi valittiin 5 V käyttöjännitelinjaan Texas Instrumentsin TPS61240 ja 12 V linjaan saman valmistajan LM4510. Akkulaturin perustana olevaksi latauskontrolleriksi valittiin Microchipin MCP73831, joka on suunniteltu yksikennoisten litium-ioni- ja litium-polymeeriakkujen lataukseen [10].

Jänniteohjauksessa oskillaattorissa HMC431LP4E ei ole lainkaan ohjaustuloa, jolla oskillaattorin voisi ohjata päälle tai pois [11]. Lisäksi sitä käytetään 3,3 V jännitteellä, joka on myös mikrokontrollerin käyttöjännite. Tämän takia oskillaattorin päälle/pois -ohjaus oli toteutettava puolijohteilla. Toteutukseksi valittiin N-tyypin ja P-tyypin MOSFET-transistoreita käyttävä kytkentä, joka on esitetty kuvassa 5. Käyttöjännite tuodaan PMOS:n lähteelle ja vastuksen kautta hilalle. Ohjaussignaali on kytketty NMOS:n hilalle. Kun ohjaussignaali kytketään, alkaa NMOS johtaa ja maadoittaa PMOS:n hilan. PMOS siirtyy johtavaan tilaan ja kuormalle kytkeytyy käyttöjännite [12]. NMOS-komponentiksi valittiin Diodes Inc:n DMG1012UW, jonka kynnysjännite $V_{GS(th)}$ on 0,5 V - 1,0 V, joten se johtaa 3,3 V ohjausjännitteellä [13]. PMOS-komponenttina toimii On Semiconductorin NDS332P. Sen $V_{GS(th)}$ on -0,4 V - (-1 V), joten tämäkin johtaa 3,3 V jännitteellä. NDS332P:n jatkuva nieluvirta I_D on 1A, mikä ylittää oskillaattorin 34 mA virrankulutuksen [11, 14].



Kuva 5. N-ohjattu PMOS-kytkin.

3.1.2 Passiivikomponenttien valinta

Passiivikomponenttien valinta aktiivikomponenttien ympärille aloitettiin jännitelähdemoduulista. Yleensä komponenttivalmistajien datalehdillä on referenssikytkentöjä ja jopa komponenttistauksia. 3,3 V jännitelähdepiiriksi oli valittu MIC23050. Sen datalehden loppupuolella on tyypillinen piirikaavio ja komponenttiluettelo, joiden mukaan jännitelähde on suositeltavaa rakentaa, ellei sovelluksella ole erityisiä vaatimuksia esimerkiksi jännitteen rippelille tai transienttivasteelle [9]. MIC23050:n komponenttiluettelo on taulukossa 2 [9]. Soveltuvia keloja on luettelossa useampi, joista yleisesti suositellaan käytettäväksi 1 μH kela. Kelan huippuvirta lasketaan datalehden mukaan kaavalla 1.

$$I_{pk} = I_{out} + V_{out} \frac{1 - \frac{V_{out}}{V_{in}}}{2fL} \quad (1)$$

missä I_{pk} = kelan huippuvirta
 I_{out} = jännitelähteen lähtövirta
 V_{out} = lähtöjännite
 f = kytkentätaajuus
 L = kelan induktanssi

Mikrokontrollerin virrankulutus suurimmillaan on noin 10 mA ja jänniteohjatun oskillaattorin virrankulutus on noin 35 mA. Sijoittamalla ne kaavaan 1, kun kytkentätaajuus on 4 MHz, kela 1 μH , V_{out} 3,3 V ja V_{in} 3,7 V, saadaan tarvittavaksi huippuvirran kestoksi 90 mA. Taulukossa 2 mainituista 1 μH keloista sovellukseen käy siis mikä tahansa.

Taulukko 2. MIC23050:n komponenttiluettelo.

Komponentti	Osanumero	Valmistaja	Arvo
C1, C2	C1608X5R0J475K	TDK	4,7 μ F, 6.3 V, X5R, 0603
C3	C1608C0G1H561J	TDK	560 pF, 50 V, NPO, 0603
L1	LQM21PN1R0MC0D	Murata	1 μ H, 0.8 A, 190 m Ω
	LQH32CN1R0M33	Murata	1 μ H, 1 A, 60 m Ω
	LQM31PN1R0M00	Murata	1 μ H, 1,2 A, 120 m Ω
	GLF251812T1R0M	TDK	1 μ H, 0,8 A, 100 m Ω
	LQM31PNR47M00	Murata	0,47 μ H, 1,4 A, 80 m Ω
	MIPF2520D1R5	FDK	1,5 μ H, 1,5 A, 70 m Ω

Myös 5 V jännitelähteeksi valitun TPS61240:n datalehdellä on sekä referenssikytkentä että komponenttiluettelo. Referenssikytkennässä on käytetty 1 μ H kela. Kelan valintaa käsittelevässä datalehdessä TPS61240:n kerrotaan olevan optimoitu 1 μ H - 2,2 μ H keloille ja tyypillisissä sovelluksissa 1 μ H kela suositellaan käytettäväksi [15]. TPS61240:n komponenttiluettelo on esitetty taulukossa 3 [15]. Kelan huippuvirran laskemiseksi datalehdellä on annettu kaava 2.

$$I_{L(peak)} = \frac{V_{IN}D}{2fL} + \frac{I_{OUT}}{(1-D)\eta}, \text{ jossa } D = \frac{V_{OUT} - V_{IN}}{V_{OUT}} \quad (2)$$

missä $I_{L(peak)}$ = kelan huippuvirta
 V_{IN} = tulojännite
 V_{OUT} = lähtöjännite
 I_{OUT} = lähtövirta
 η = hyötysuhde

5 V jännitesyöttö tarvitaan mittaussignaalin ilmaisimelle, jonka virrankulutus käynnissä ollessaan on 68 mA. Sijoittamalla sen lisäksi kaavaan V_{IN} 3,7 V, V_{OUT} 5,0 V, taajuus 3,5 MHz, L 1 μ H sekä hyötysuhde η 0,85, saadaan huippuvirraksi noin 270 mA.

Taulukko 3. TPS61240:n komponenttiluettelo.

Komponentti	Osanumero	Valmistaja	Arvo
CIN	JMK105BJ225MV	Taio Yuden	2,2 μ F, X5R, 6,3 V, 0402
COU	JDK105BJ475MV	Taio Yuden	4,7 μ F, X5R, 6,3 V, 0402
L	MDT2012-CH1R0AN	TOKO	1,0 μ F, 900 mA, 0805

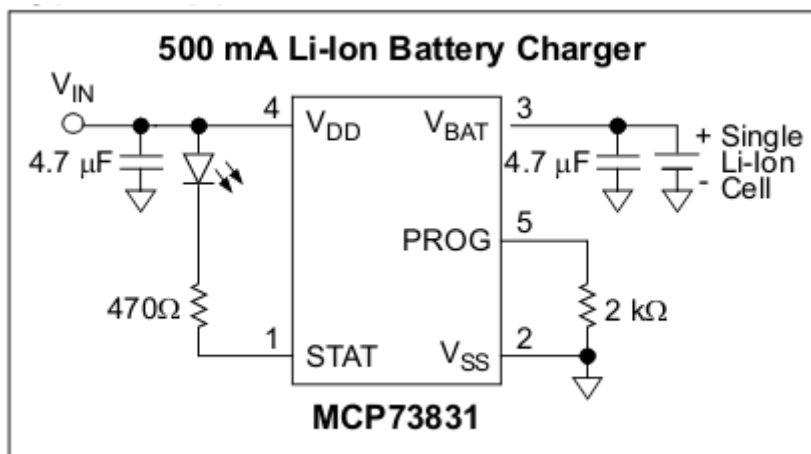
Edellisistä jännitelähdepiireistä poiketen 12 V jännite muodostetaan säädettävällä LM4510 DC-DC-muuntimella. Muuntimen lähtöjännite määritetään kahden takaisinkytkentävastuksen avulla. Sen datalehdellä on kaava takaisinkytkentävastusten arvojen määrittelyyn sekä taulukko komponenttien suositusarvoista ennalta valituille lähtöjännitteille. Kelan induktanssiksi suositellaan 4,7 μ H - 15 μ H [16]. Sijoittamalla kaavaan 2 arvot L 4,7 μ H, V_{IN} 3,7 V, V_{OUT} 5,0 V, taajuus 1 MHz, virta 0,5 mA sekä hyötysuhde 0,5 saadaan kelan huippuvirraksi noin 275 mA.

Laskuharjoitusten jälkeen päästiin valitsemaan sopivat kelat jännitelähteille. Koska mittaus tehdään RF-signaalilla ja haluttiin mahdollisimman vähän häiriöitä mittaustapahtumaan, asetettiin keloille vaatimukseksi suojaus (shield). Näin ne voidaan myös sijoittaa piirilevyllä suojaamattomia keloja lähemmäs toisiaan. Kelojen fyysistä kokoa tarkastellessa on muistettava myös DC-resistanssi, joka kasvaa kelan kokoa pienentäessä. DC-resistanssi voi vaikuttaa negatiivisesti jännitelähteen hyötysuhteeseen [9]. Valitut Bourns:n valmistamat kelat on esitetty taulukossa 4. Kondensaattoreiksi DC-DC-muuntimiin ohjeistetaan valitsemaan X5R- tai X7R-tyyppistä dielektristä materiaalia sisältävät kondensaattorit niiden hyvän sarjaresistanssille käänteisen laatuvarvon vuoksi [17, s. 18].

Taulukko 2. Jännitelähteiden kelat.

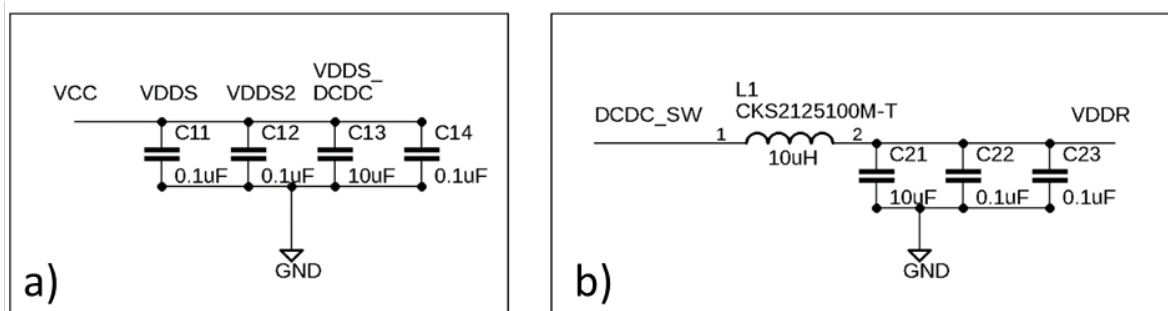
U	L	Tuote	Virrankesto	DC-resistanssi
3,3 V	1 μ H	SRP0412-1R0K	5,3 A	13 m Ω
5 V	1 μ H	SRR6040A-1R0Y	5,0 A	9,8 m Ω
12 V	5 μ H	SRR6040A-5R0Y	2,9 A	18 m Ω

Akkulaturipiiri MCP73831 tarvitsee ympärilleen kaksi 4,7 μ F kondensaattoria, kaksi vastusta (470 Ω ja 2 k Ω) ja ledin. USB-laturikäyttöä varten jännitetulossa suositellaan käytettäväksi transienttisuojaodiota, joka suodattaa mahdollisen kaapeliin ennen kytkentää indusoituneen jännitteen. Datalehden referenssikytkentä on esitetty kuvassa 6 [10].



Kuva 6. Akkulaturin kytkentä.

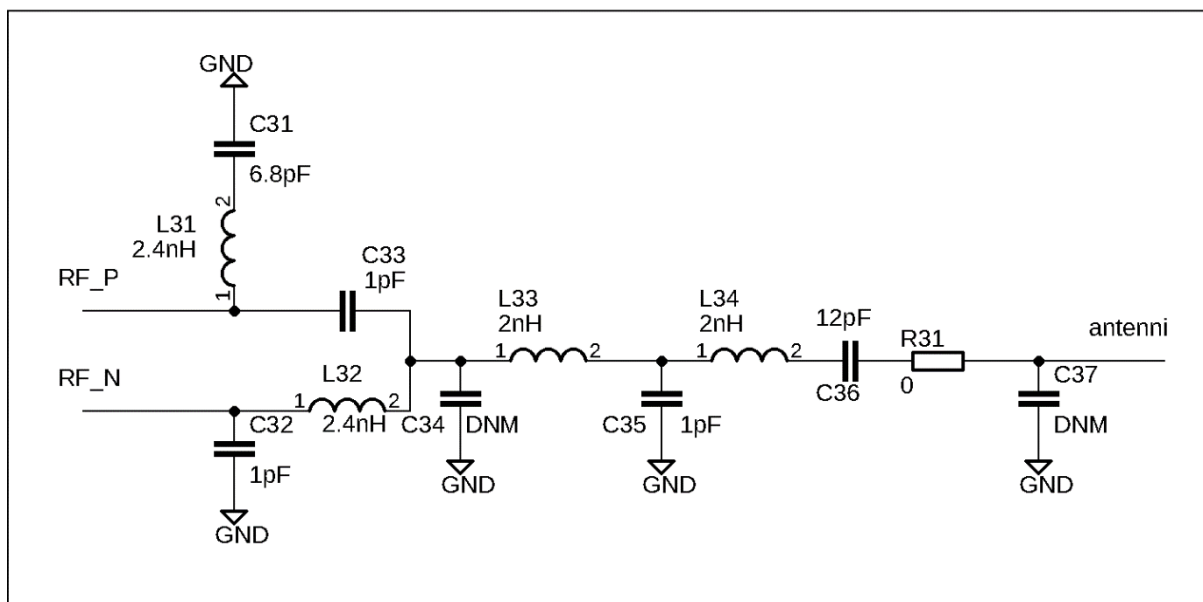
Mittalaitteen mikrokontrollerina käytettävään CC2640R2F:ään liittyvät komponentit voidaan jakaa kolmeen ryhmään: käyttöjännitteiden suodatus, JTAG-debuggeriliitäntä, Bluetooth-tiedonsiirto sekä I/O-portit. Tarkastellaan ensin käyttöjännitteiden suodatusta. Mikrokontrollerissa on sisäinen DC-DC-muunnin, jonka lähtöjännite viehdään muuntimen lähdestä reguloidun jännitteen pinneihin. Sekä käyttöjännite että reguloitu jännite tarvitsevat omat suodatuskondensaattorit (decoupling capacitors) ja kelat, joille on esitetty referenssikytkennät datalehdellä [7, s. 45]. Kaikissa valmistajan referenssikytkennöissä ei ole käyttöjännitelinjassa ennen kondensaattoreita olevaa kela, esimerkiksi kytkennässä TIDA-01624 [18]. Niinpä kyseinen kela jätettiin myös tästä pois. Käyttöjännitteen (VDDSD) ja reguloidun jännitteen (VDDRD) suodatuskytkennät on esitetty kuvissa 7 a) ja b).



Kuva 7. Käyttöjännitteen suodatus a) kondensaattoreilla sekä b) reguloidun jännitteen suodatus kelalla ja kondensaattoreilla.

JTAG-debuggeriliitäntä vaatii liittimen lisäksi reset-pinnin kytkennän. Huomattavaa on, että pinnissä ei ole sisäistä ylösvetovastusta [6, s. 16]. Kytkeäntä siis vaatii erillisen ylösvetovastuksen ja noin 100 nF kondensaattorin reset-pinnin ja JTAG-liittimen väliin. JTAG-liittimeksi valittiin lopulta 10-pinninen 1,27 mm pinnijaolla oleva liitin. Ensimmäisessä suunnitelmassa oli 20-pinninen 2,54 mm jaollinen liitin, mutta se oli laitteen kokoon nähden liian suuri. Muita oheiskomponentteja JTAG-liitäntä ei piirilevyllä vaadi.

Bluetooth-tiedonsiirtoa varten mikrokontrollerissa on pinnit, joihin 2,4 GHz taajuusalueella toimiva antenni kytketään. Antennin voi sovittaa mikrokontrollerin lähtöön joko erillisten kelojen ja kondensaattorien muodostamalla suodatinverkolla tai balun-suodinkomponentilla, joka samalla säästää tilaa [19]. Piirilevyjen tilaushetkellä sopivien balun-suodinten varastosaldot toimittajilla olivat nollassa, ja toimitusaika olisi ollut useampi kuukausi. Suunnitelmassa ollut balun korvattiin sisäisesti biasoidulla differentiaalisella kytkennällä [20]. Kytkeäntä on esitetty kuvassa 8, jossa DNM tarkoittaa tyhjäksi jäävää komponenttia. Lisäksi Bluetooth-tiedonsiirtoa varten tarvitaan 24 MHz kide, joka täyttää datalehdellä asetetut vaatimukset. Kiteelle asetetut vaatimukset on esitetty taulukossa 5 [6].



Kuva 8. Antennin sovitin mikrokontrollerille.

Taulukko 5. CC2640R2F:n vaatimukset 24 MHz:n kiteelle.

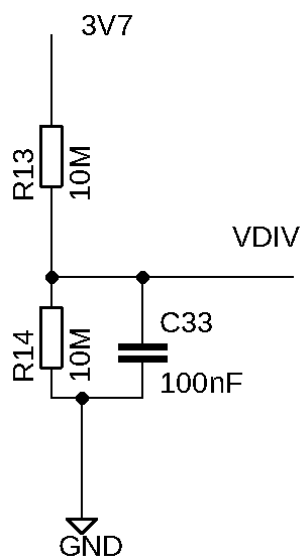
Parametri	Ehdot	Min	Typ	Max
ESR-sarjaresistanssi	$6 \text{ pF} < C_L \leq 9 \text{ pF}$		20Ω	60Ω
ESR-sarjaresistanssi	$5 \text{ pF} < C_L \leq 6 \text{ pF}$			80Ω
L_M liikeinduktanssi			$< 1,6 \times 10^{-24} / C_L^2$	
C_L		5 pF		9 pF
Kiteen taajuus			24 MHz	
Kiteen taajuusvaihtelu		-40 ppm		40 ppm
Käynnistysaika			$150 \mu\text{s}$	

Mikrokontrollerin vapaisiin I/O-portteihin suunniteltiin kytkettäväksi led, kytkin ja akkujännitteen seuranta. Lediksi valittiin punainen 0603-kokoinen led, jonka maksimivirta on 30 mA [21]. Virtaa rajoittaa 470Ω vastus, jolloin 3,3 V jännitteellä ledin läpi kulkee 7 mA virta. Kytkimenä on tavanomainen 4-jalkainen painonappi.

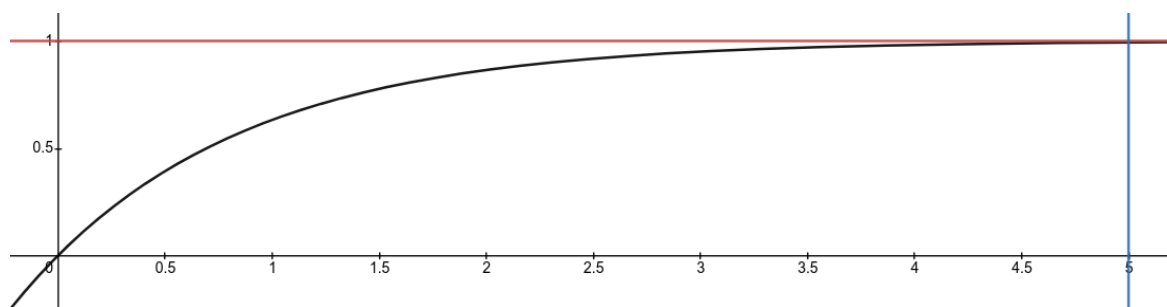
Akkujännitteen seurantaa varten suunniteltiin jännitteenjakokytkentä, koska akkujännite on suurempi kuin mikrokontrollerin käyttöjännite. Tavallinen kahdella vastuksella toteutettu jännitteenjako kuluttaisi jatkuvasti virtaa. Esim. $10 \text{ k}\Omega + 10 \text{ k}\Omega$ jännitteenjaon virrankulutus 3,7 V jännitteellä olisi n. $200 \mu\text{A}$. Lisäämällä kondensaattori maan ja mikrokontrollerin välissä olevan vastuksen rinnalle saadaan virrankulutus minimoitua ja vastusten resistanssia kasvatettua (kuva 9). Lasketaan kytkennän aikavakio τ sijoittamalla kaavaan 3 arvot $R_1 = R_2 = 10 \text{ M}\Omega$ ja $C = 100 \text{ nF}$, jolloin saadaan tulokseksi 0,5 s. Koska RC-kytkennän stabiili tila saavutetaan viiden aikavakion kuluessa, 2,5 s on lyhin mahdollinen väli akkujännitteen lukemiseen. Aikavakion vaikutus kondensaattorin jännitteeseen on esitetty kuvassa 10.

$$\tau = RC, \text{ jossa } R = \frac{R_1 * R_2}{R_1 + R_2} \quad (3)$$

missä τ = aikavakio
 R = resistanssi
 C = kapasitanssi



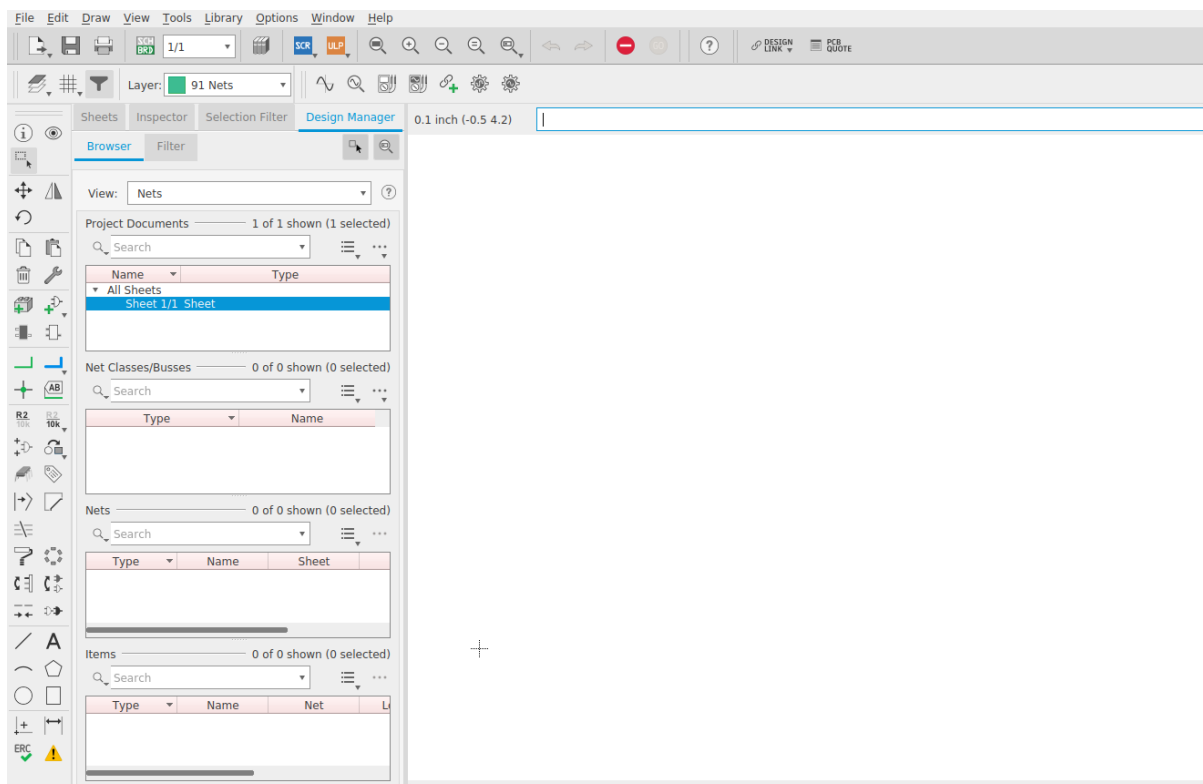
Kuva 9. Akkujännitteen mittauskytkentä.



Kuva 10. Aikavakion vaikutus RC-kytkennän jännitteeseen. Aikavakio τ on X-akselilla.

3.2 Työkalut

Piirilevysuunnittelussa tärkeimpänä työkaluna oli ilmaisversio Autodeskin valmistamasta Eaglesta, joka on piirikaavioiden ja piirilevyn piirtämiseen tarkoitettu EDA-ohjelma. Eagle on saatavilla Linux-ympäristöihin, Windowsille ja macOS:lle. Ilmaisversion käyttö rajaa suunnitelman kaksisivuiseksi ja piirilevyn maksimissaan kaksikerroksiseksi ja pinta-alaltaan 80 cm² kokoiseksi [22]. Ohjelman työpöytä on esitetty kuvassa 11.



Kuva 11. Kuvakaappaus Autodesk Eaglen työpöydästä.

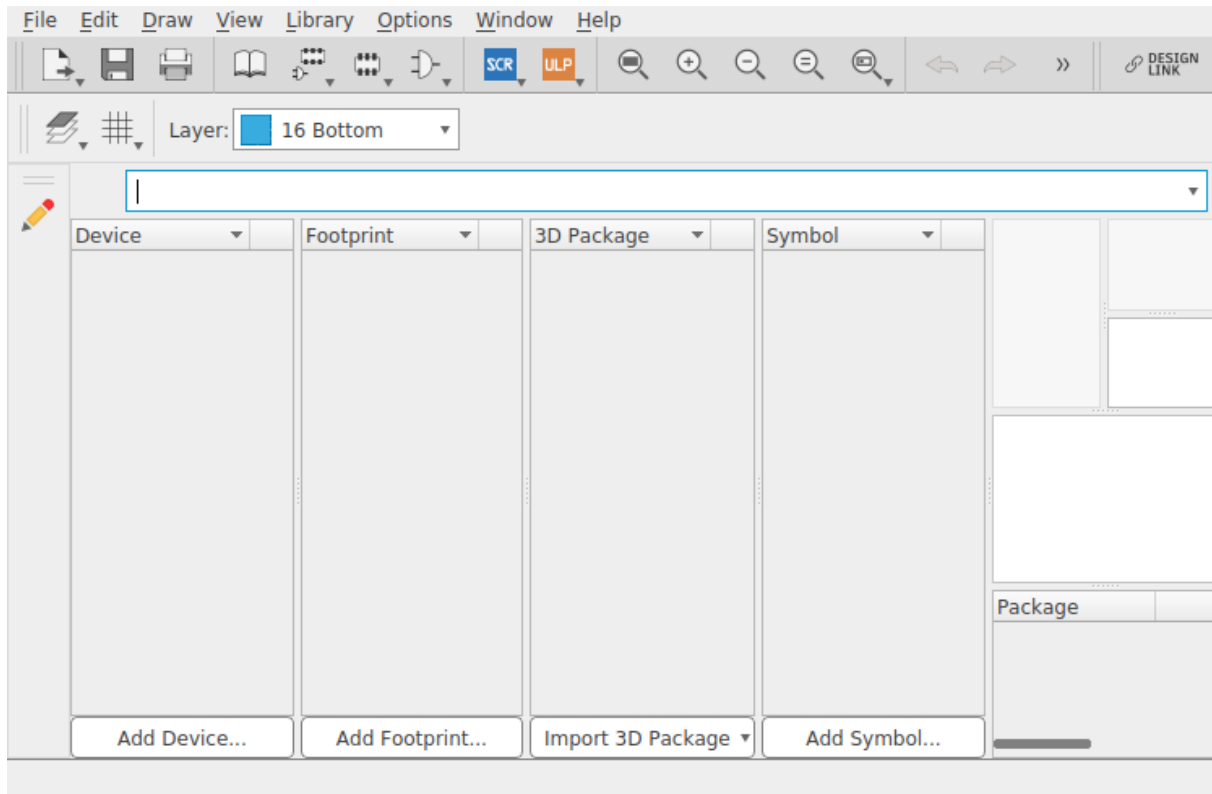
3.2.1 Piirikaavion piirtäminen

Piirikaavion piirtäminen Eaglessa perustuu komponenttien symboleiden ja johtimien käyttöön. Eagle sisältää joitain peruskomponenttikirjastoja, kuten vastuksia ja kondensaattoreita. Lisää kirjastoja on ladattavissa Eaglen verkkosivuilta.

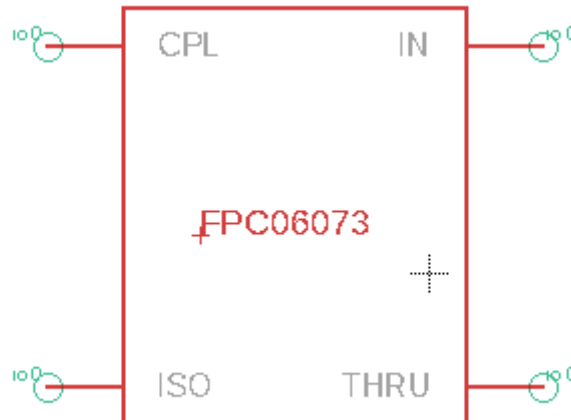
Piirikaavion voi piirtää yhtenä kokonaisuutena, jolloin kaikki komponentit kytkeytyvät toisiinsa suorilla johtimilla. Tämä onkin toimiva ratkaisu pienissä, muutamia komponentteja sisältävissä kytkennöissä. Suurempia kokonaisuuksia suunnitellessa on syytä jakaa piirikaavio toiminnallisiin lohkoihin tai moduuleihin. Tässä työssä piirikaavion lohkot sopivat yhdelle sivulle, mutta laajemmissa projekteissa piirroksat jaetaan useammalle sivulle.

Piirtäminen aloitettiin komponenttikirjastoon tutustumisella. Eaglen peruskomponenttivalikoimassa ei ole integroituja piirejä, joten niiden symbolit on haettava internetissä olevista komponenttikirjastoista kuten componentsearchengine.com [23]. Komponenttikirjastojen käyttö edellyttää yleensä veloitusetta rekisteröitymistä kirjastojen käyttäjäksi. Kirjastojen valikoima on kattava, mutta kaikkia komponentteja niistä ei löydy. Silloin vaihtoehtona on joko etsiä uusi vastaava komponentti toimittajalta tai piirtää piirikaaviosymboli ja komponentin kotelointi pinnineen itse.

Suuntakytkimelle ei ollut valmista symbolia, joten sille luotiin uusi kirjasto, joka on kuvassa 12. Kirjastoon piirrettiin symboli, kotelointi ja lisättiin laite. Symbolin voi yksinkertaisimmillaan piirtää laatikoksi, jonka ympärille lisätään pinnit. Symbolissa tulisi olla ainakin komponentin nimi. Kun symboli oli piirretty, lisätään työkalulla pinnit, minkä jälkeen pinnit nimetään nimeämistyökalulla. Valmis symboli on kuvassa 13.



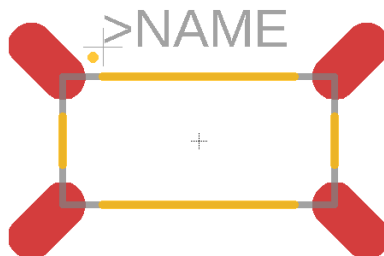
Kuva 12. Eaglen tyhjä kirjasto.



Kuva 13. Eaglen kirjastoon lisätty symboli.

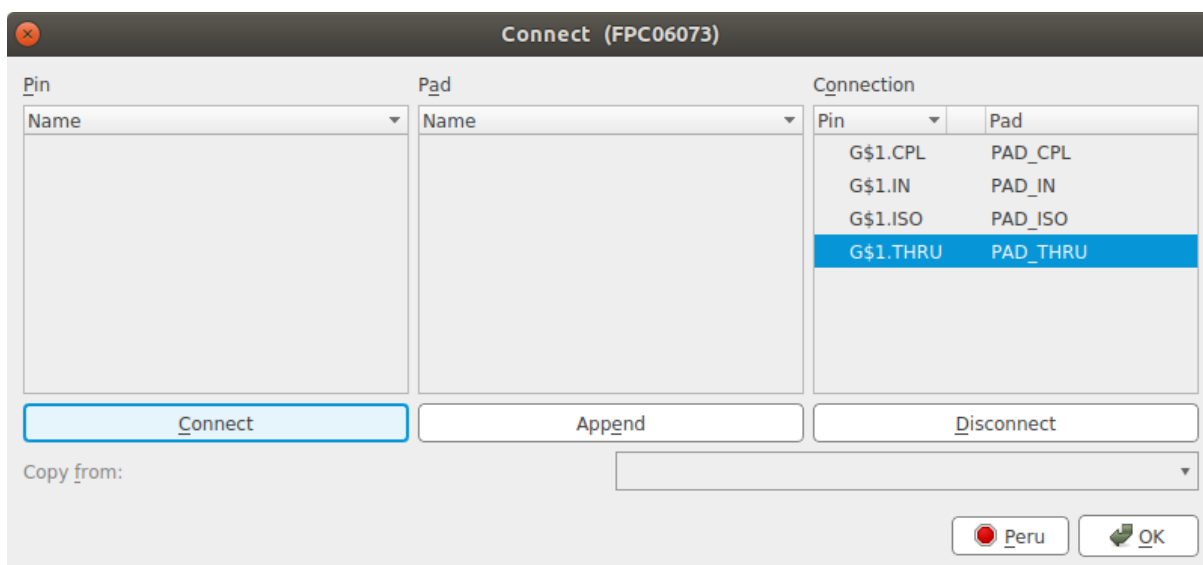
Symbolin valmistuttua siirryttiin piirtämään mittatarkkaa kotelointia (footprint). Sitä varten katsottiin komponentin mitat datalehdeltä ja asetettiin piirtämisen apuna käytettävän ruudukon jako sopivaksi (1 mil). Ensin piirrettiin komponentin ääriviivat suorakulmioksi johdintyökalulla. Tasona tässä kohtaa oli 51 tDocu, jolla kotelo näkyy vain Eaglen sijoittelukuvassa. Huomattavaa on, että komponentin keskipisteen tulee olla piirustuksen nollapisteessä, jotta sen sijainti tulee merkityksi oikein valmistusvaiheessa latomakoneelle tarvittavassa pick'n'place -tiedostossa. Sen jälkeen lisättiin juotospadit Smd-työkalulla, joka valitsee automaattisesti tasoksi 1 Top. Padit sai mitoitettua, pyöristettyä ja oikeaan kulmaan työkalun asetuksilla. Kun padit oli lisätty, ne nimettiin nimeämistyökalulla. Nämä eivät vielä

riittäneet, vaan silkkipainatusta varten piirrettiin komponentin ulkoreunojen merkkaukset ja ykköspadin merkkipiste tasolle 21 tPlace. Silkkipainatus ei saa osua juotospadien kohdalle. Lopuksi lisättiin tekstityökalulla nimi parametrilla >NAME tasolle 25 tNames. Kotelo on esitetty kuvassa 14, jossa tason 21 väri on muutettu harmaasta keltaiseksi havainnollisuuden vuoksi.



Kuva 14. Valmis koteloinnin kuva juotospadeineen.

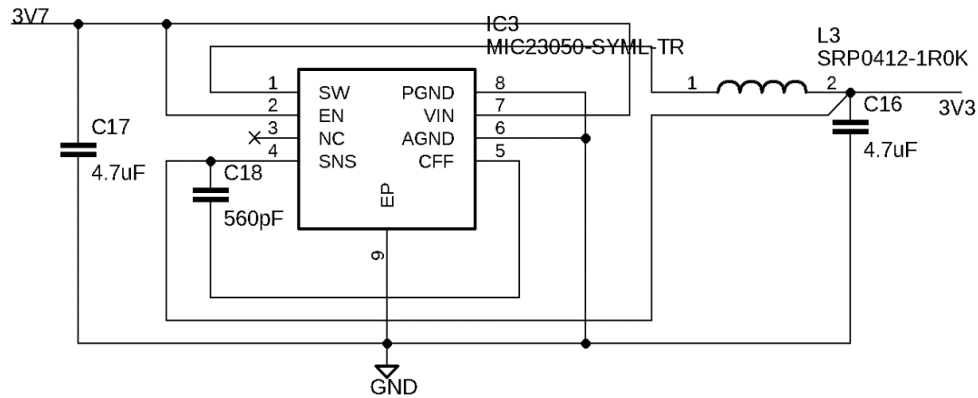
Lopuksi luotiin uusi laite (device), johon tuotiin ensin piirretty symboli Add Part -työkalulla. Sen jälkeen lisättiin piirretty kotelointi ja yhdistettiin symbolin pinnit sekä koteloinnin padit toisiinsa, mikä on esitetty kuvassa 15. Komponentti oli valmis lisättäväksi piirikaavioon.



Kuva 15. Pinnien ja padien yhdistäminen.

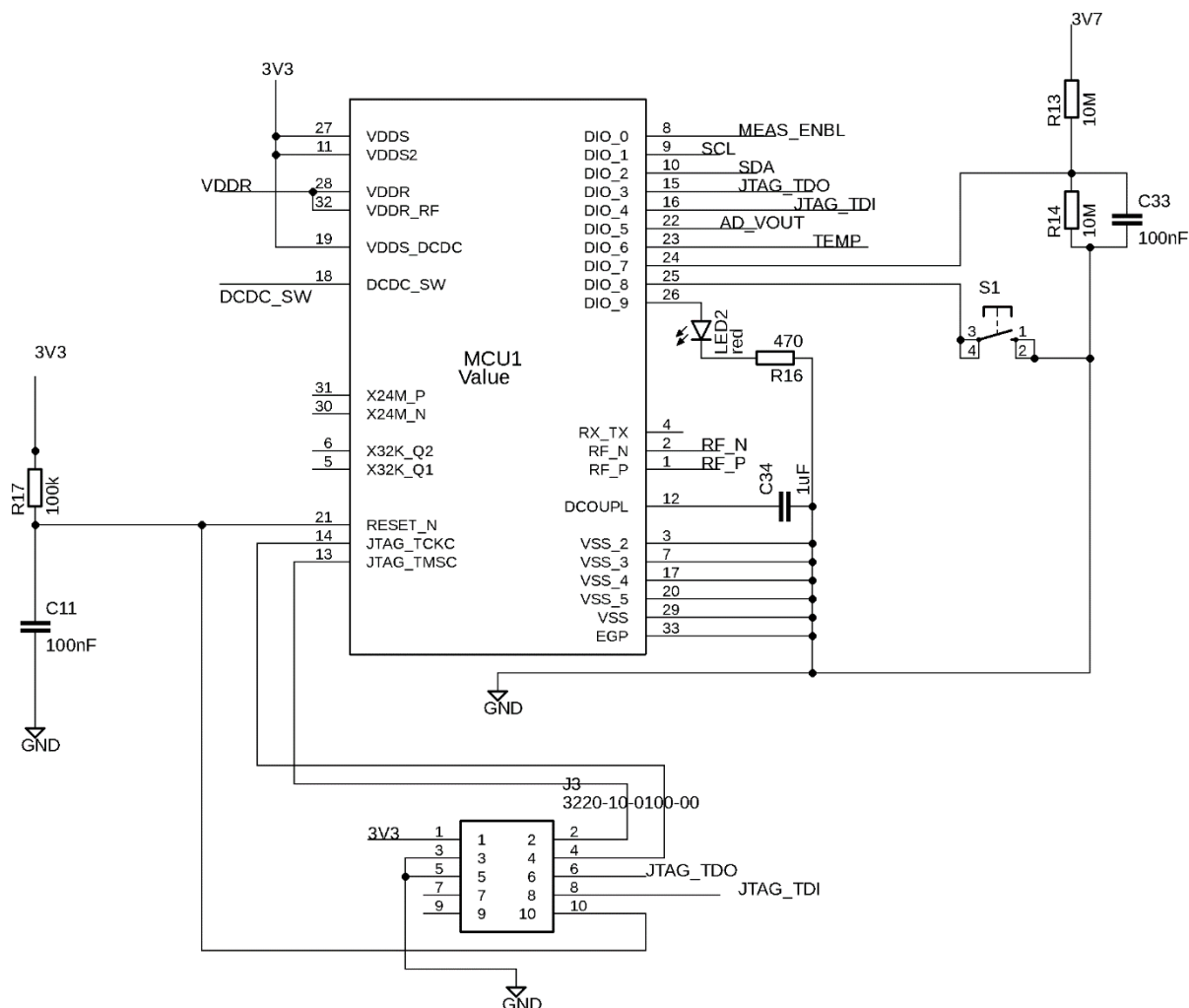
Piirikaavion piirtäminen aloitettiin osien (part) lisäämisellä tyhjälle arkille (sheet). Piirtäminen aloitettiin akkulaturista ja jännitelähteistä. Akkulaturi- ja jännitelähdepiireille haettiin symbolit komponenttikirjastoista. Lisäksi kirjastoista oli noudettava soveltuvien kelojen symbolit. Kelojen symboleita etsiessä huomattiin, että symboleita ei välttämättä löydy juuri haetun komponentin tuotekoodilla. Sen sijaan jättämällä hakusanasta pois kelan induktanssia kuvaava osa symboleita löytyi. Varmistamalla datalehdeltä komponentin sama koko voitiin käyttää eri induktanssisen kelan symbolia. Komponentit aseteltiin arkille yksitellen datalehdillä olevia referenssikytkentöjä apuna käyttäen. Vastuksina ja kondensaattoreina käytettiin 0603- ja 0402-kokoisia komponentteja. 0603-koko vastaa 1,5x0,8 mm komponenttia ja 0402 vastaa 1,0x0,5 mm komponenttia [24]. Komponenttien lisäämisen jälkeen vastuksille

ja kondensaattoreille määriteltiin piirikaaviossa näkyvät arvot Value-työkalulla. Myös kelojen arvot asetettiin oikeiksi, vaikka Eagle varoittaa, ettei osalla ole käyttäjän määritettävissä olevaa arvoa. Seuraavaksi johdotettiin komponentit toisiinsa. Akkulaturille piirrettiin yhdysjohtimien lisäksi akkujännitteen lähtöjohdin ja jännitelähteille sekä tulo- että lähtöjohtimet. Akkujännitteen lähtöjohtimen sekä jännitelähteiden tulojohtimien nimeksi annettiin 3V7. Jännitelähteiden lähdöt nimettiin vastaavasti 3V3, 5V0 ja 12V. 3,3V jännitelähdepiiri on esitetty kuvassa 16. Muut jännitelähteet ovat liitteenä 1 olevassa piirikaaviossa.



Kuva 16. 3,3 V jännitelähteen kytkentä.

Mikrokontrollerin EDA-tiedostot ladattiin valmistajan sivustolta. Käyttöjännitteet, niiden suodattimet ja JTAG-kytkentä piirrettiin referenssikytkentöjä noudattaen [18]. Digitaalisia I/O-liitäntöjä otettiin käyttöön seitsemän: mittauksen sallinta (MEAS_ENBL), I²C-väylä (SCL ja SDA), JTAG-datapinnit (JTAG_TDO ja JTAG_TDI), kytkin ja led. Analogisia tuloja on kolme: signaalin tehotaso AD8318:lta (AD_VOUT), AD8318:n lämpötila (TEMP) sekä akkujännite jännitteenjakajan kautta. Mikrokontrollerin kytkentä on esitetty kuvassa 17. Kuvasta puuttuu pinneihin 31 ja 30 kytkettävä 24 MHz kide.

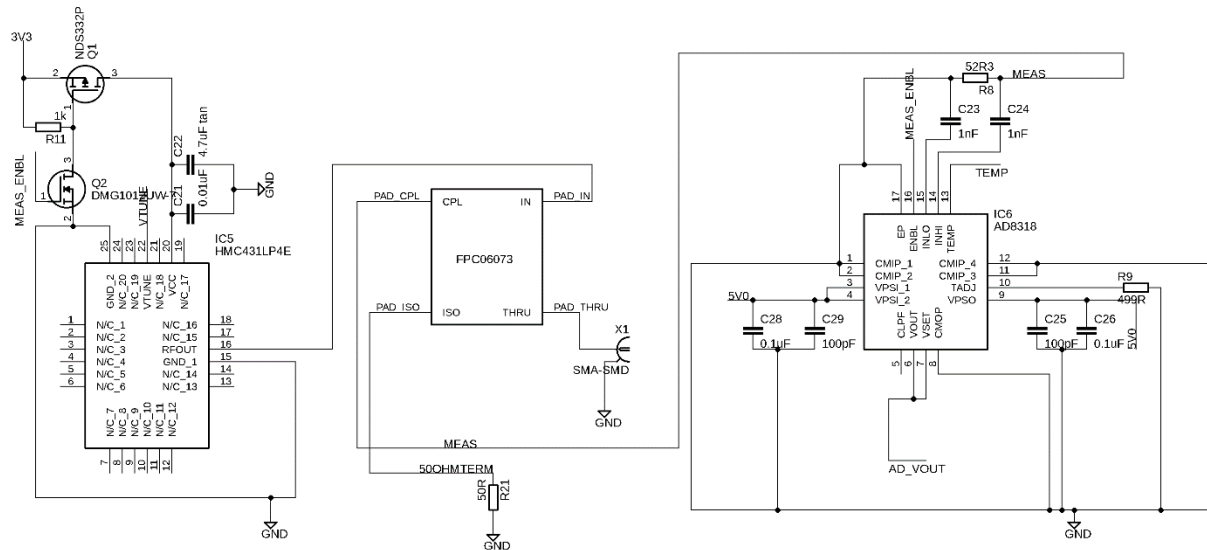


Kuva 17. Mikrokontrollerin kytkentä.

Bluetooth-antennin sovitin rakennettiin myös referenssiyhteyden perusteella [20]. Antenniksi valittiin piirilevyn kuparista muodostettava 2,4 GHz invertoitu F-antenni, jolle löytyi valmis symboli ja piirilevyelementti [25].

Jänniteohjatun oskillaattorin toimiva ohjauskytkentä oli suunniteltu jo aiemmassa prototyyppivaiheessa valmiiksi, joten käytettiin sitä. Jänniteohjatun oskillaattorin ja ilmaisimen kytkentöjen piirtämisessä mallia katsottiin piirien datalehtien referenssikytkennöistä [11, 25]. Referenssikytkennän 0 Ω vastukset korvattiin johtimilla ja avoimien vastusten sekä kondensaattorin ohessa olevat kytkennät jätettiin pois.

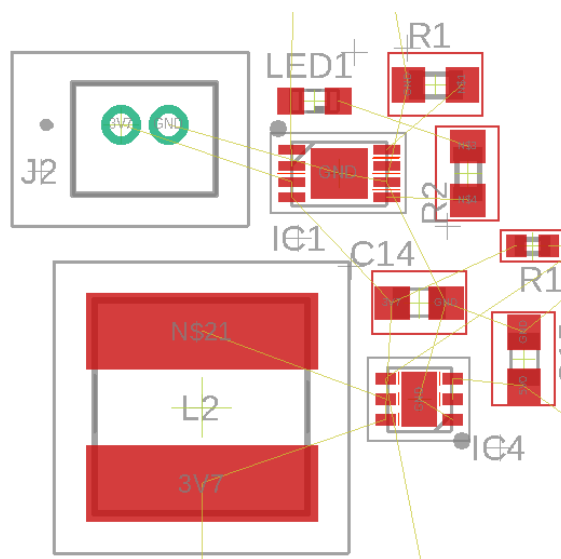
Suuntakytkimen tuloon kytkettiin oskillaattorin lähtö, CPL-porttiin ilmaisimen tulo ja THRU-porttiin resonaattori SMA-liittimen kautta. Neljäs portti kytkettiin $50\ \Omega$ päätevastuksen kautta maahan. RF-mittauspiiri on esitetty kuvassa 18. Piirikaavion valmistuttua tehtiin tarkastus ERC-työkalulla, joka huomauttelee mm. irtonaisista pinneistä ja mahdollisesti tahattomasti risteävistä tai kytkemättömistä johtimista.



Kuva 18. RF-mittauskytkentä.

3.2.2 Komponenttien sijoittelu piirilevyllä

Piirikaaviovaiheesta siirryttiin piirilevyn suunnitteluun Switch to board -toiminnolla. Kun piirikaaviosta vaihdettiin ensimmäisen kerran piirilevyllä, komponentit olivat kasattuna suunnittelualueen alapuolelle. Piirikaaviota apuna käyttäen komponentit siirrettiin piirilevyn puolelle. Komponentin siirtäminen levyn alueen ulkopuolella tai ulkopuolelle aiheuttaa virheilmoituksen, joten komponentit on siirrettävä suoraan suunnittelualueelle. Ensin ryhmiteltiin komponentit piirilevyllä lohkoittain, mikä jälkeen sijoiteltiin komponentit alustavasti IC-piirien ympärille. Erityisesti kondensaattorit siirrettiin mahdollisimman lähelle kytkentäpinnejä. Kuvassa 19 on esimerkki akkulaturin ja 5 V jännitelähteen komponenttien sijoittelusta. Ohuet keltaiset kytkentöjä tarkoittavat viivat ovat välttämätön apu komponentteja siirtäessä ja käännellessä sopivaan asentoon.



Kuva 19. Akkulaturin ja 5 V jännitelähteen komponentit sijoiteltuna.

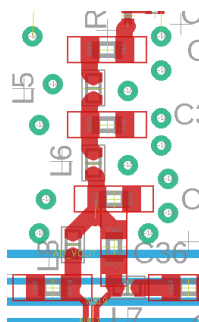
Suunniteltavassa laitteessa käytetään RF-signaalia mittaukseen, joten RF-signaalia käsittelevistä komponenteista haluttiin radiotaajusten häiriöiden ja ristiin kytketymisen välttämiseksi tehdä oma saarekkeensa levyllä. Niinpä RF-komponentit sijoitettiin piirilevyn alaosaan etäälle tasajännitekomponenteista ja hakkurijännitelähteistä. RF-komponentteja sisältävät piirilevyt suositellaan suunniteltaviksi monikerrospiirilevyille, jolloin yksi kuparikerros toimisi pelkkänä maatasona [17]. Käytössä ollut Eaglen ilmaisversio kuitenkin rajoitti piirilevyn kerrosten määrän kahteen, joten kompromisseja jouduttiin tekemään.

3.2.3 Johtimien ja läpivientien piirtäminen

Ennen johdotuksien piirtämistä määritettiin DRC-toiminnon asetukset, jotta Eagle osaa varoittaa jo piirtovaiheessa esim. liian lähekkäin menevistä johtimista. Johtimien ja läpivientien välistys- ja kokomääritykset saatiin käytettävältä piirilevyvalmistajalta. Kun komponentit oli sijoitettu paikalleen ja asetukset kunnossa, aloitettiin johdotuksien piirtäminen. Ensin piirrettiin käyttöjännitelinjat 40–20 mil leveällä kuparilla. Sen jälkeen kytkettiin suodatuskondensaattorit ja muut oheiskomponentit jättäen GND-pinnit vielä tässä vaiheessa irti. Signaalijohdotukset tehtiin läpivientien (via) avulla pääasiassa levyn alapuolelle, mutta osittain signaaleja jouduttiin kuljettamaan myös levyn yläpinnassa, pääasiassa jonkin toisen johtimen yli mentäessä. Eaglessa on olemassa autorouting-toiminto, joka piirtää johtimet sille asetettujen sääntöjen mukaan. Tässä työssä kaikki johtimet piirrettiin käsin.

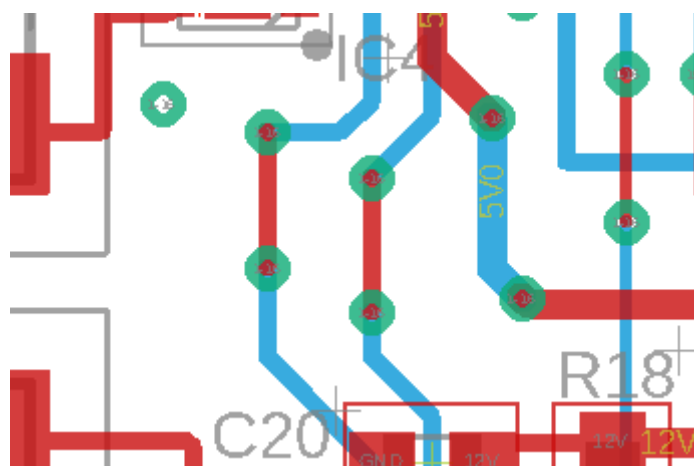
Komponentit eivät olleet vielä lopullisilla paikoillaan ennen johdotusvaihetta. Johtimia piirtäessä komponentteja jouduttiin vielä pyörittelemään optimaalisten johdotusten löytämiseksi. Esimerkiksi JTAG-liittimestä saatiin kytkettyä suurin osa johtimista, mutta viimeisten johtimien kohdalla todettiin, että on parempi kääntää liitin toisinpäin. Useita muitakin johtimia oli suunnittelutyön kuluessa poistettava ja piirrettävä uudelleen parempaa reittiä.

Johdotusten valmistuttua oli aika lisätä piirilevyllä maatason läpiviennit. Läpivientejä tulee piirtää etenkin levyn RF-alueille ristiin kytketymisen ja parasiittisen maainduktanssin estämiseksi [17]. Läpiviennit ovat hyödyllisiä myös silloin, kun halutaan viedä maataso levyn toiselle puolelle paikkaan, jonne se ei johtimien sijoittelusta johtuen muuten pääse. Läpivientejä tehtiin erityisesti Bluetooth-antennin π -sovitusverkon ja mittaussiirin RF-signaalijohtimien ympärille. Läpivientejä lisättiin myös RF-komponenttien ympäristöön ja satunnaisesti muualle piirilevyn tyhjille alueille sekä IC-piirien alle, joiden pohjassa on GND-pad. Kuvassa 20 on esimerkkinä π -verkon viereiset läpiviennit.



Kuva 20. π -verkon viereiset läpiviennit.

Seuraavaksi piirilevyn molemmille puolille muodostettiin maatasot. Levyn ympärille piirrettiin monikulmiot polygon-työkalulla sekä top- että bottom-tasolle. Invertoitu F-antenni jätettiin monikulmion ulkopuolelle. Kun monikulmiot oli piirretty, luotiin maatasot Ratsnest-työkalulla. Johdinten sijoittelun vuoksi maataso ei kuitenkaan yltänyt joka paikkaan. Tämä ongelma ratkaistiin tekemällä maatasolle polkuja viemällä johtimia hetkeksi levyn toiselle puolelle tai läpivientien avulla. Maatasolle tehty polku on esitetty kuvassa 21. Kuvassa 22 sama kohta on Ratsnest-työkalun jälkeen. Kun johdotuksiin tehtiin muutoksia, maatasot muodostettiin uudelleen Ratsnest-työkalulla. Tarvittaessa maatasot saatiin pois näkyvistä Ripup-työkalun avulla.



Kuva 21. Maatasolle tehty polku.



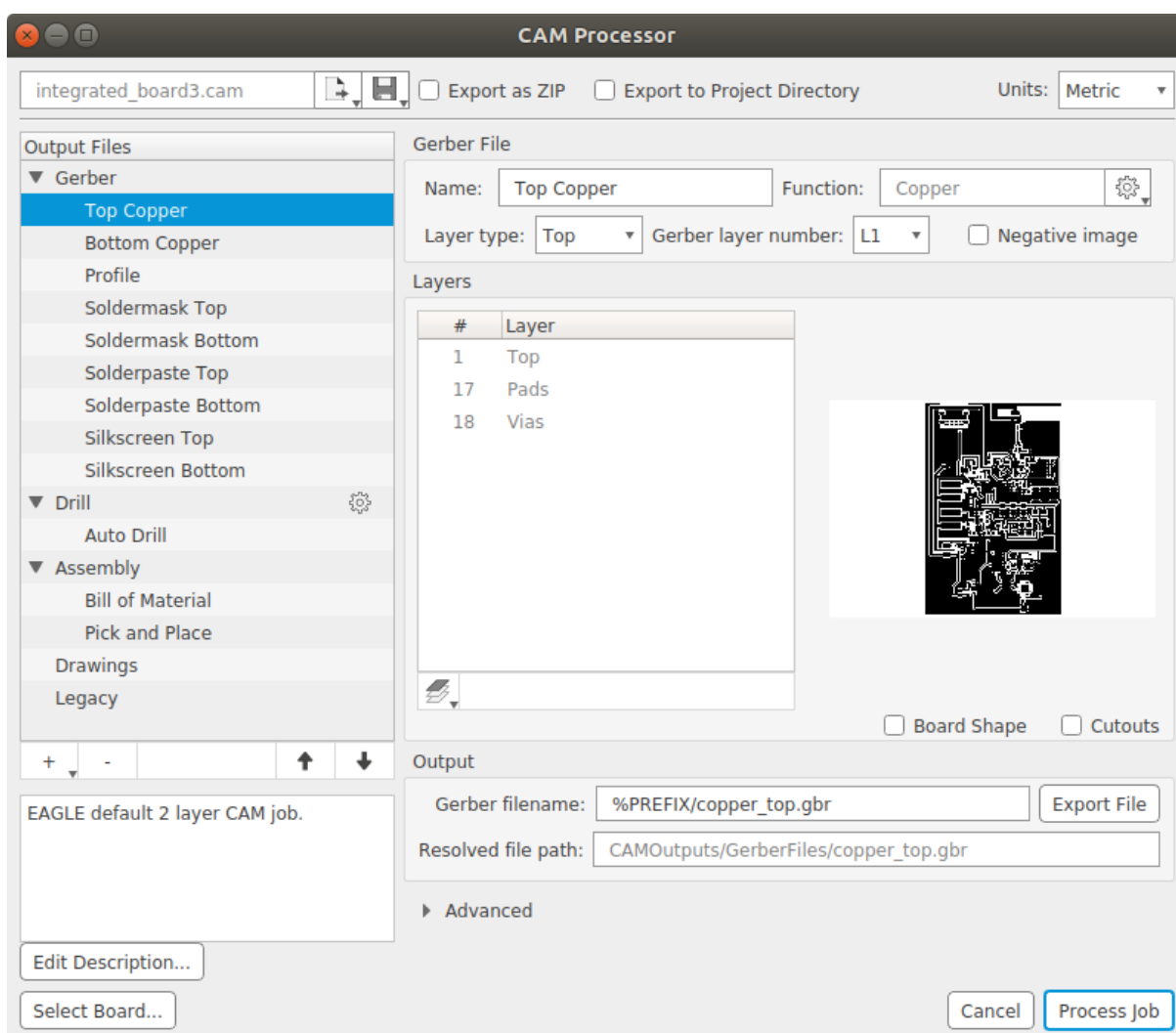
Kuva 22. Maataso lisättynä.

Lopuksi järjesteltiin levyn pintaan silkkipainatuksella tulevat komponenttien nimet. Työn helpottamiseksi piilotettiin maatasot Ripup-työkalulla. Alkuperäinen fonttikoko oli melko pieni ja se suurennettiin kokoon 32. Kaikkien nimien valitseminen fonttikoon muutosta varten onnistuu helposti piilottamalla ylimääräiset tasot. Fonttikoon muutoksen jälkeen siirrettiin ja asetoitiin komponenttien nimet siten, että ne näkyvät komponenttien vieressä selkeästi eikä sekoittumisen vaaraa pääse muodostumaan.

3.3 Piirilevyjen tilaaminen

Piirilevyjen valmistusta varten on luotava Gerber-muotoiset tiedostot ja komponenttiluettelo. Gerber-tiedostoformaatti on käytössä kaikissa suunnittelu- ja valmistusohjelmistoissa piirilevysuunnitelmien siirrossa suunnittelusta tuotantoon [27]. Tiedostot sisältävät kaiken piirilevyn valmistuksessa tarvittavan tiedon kuparikerroksista reikien poraukseen.

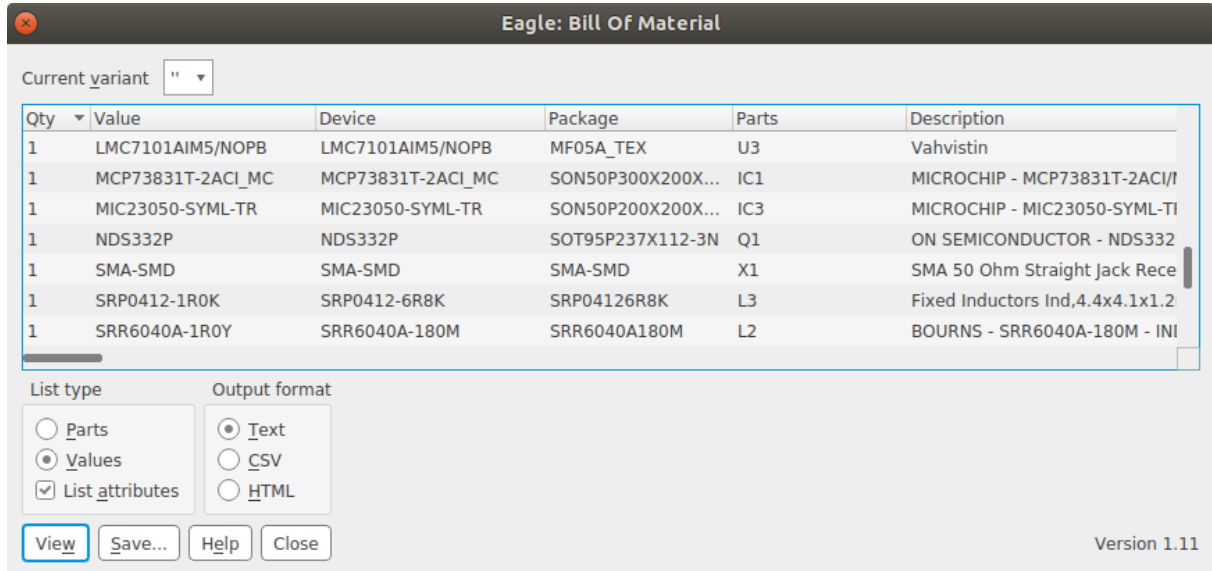
Eaglessä Gerber-tiedostot luotiin CAM Processor -työkalulla. Työkaluun tarvittavat asetukset saatiin piirilevyvalmistajalta. Työkalu tuotti kolme kansiota: Assembly, DrillFiles ja GerberFiles. Assembly-kansiossa oli komponenttien ladontaa varten tarvittavat tiedot, DrillFiles-kansiossa Excellon-muotoinen poraustiedosto ja GerberFiles-kansiossa piirilevyn kuparointiin, silkkipainatukseen ja juotosmaskiin liittyvät tiedostot. Työkalu on esitetty kuvassa 23. Luotuja tiedostoja voidaan tarkastella joko työasemalle asennettavilla sovelluksilla tai selainkäyttöisillä palveluilla.



Kuva 23. CAM Processor -työkalu.

Lisäksi luotiin komponenttiluettelo piirilevyvalmistajan hyväksymässä muodossa. Sitä varten piirikaavionäkymästä vientitoiminnolla luotiin komponenttiluettelo eli BOM (Bill of

Materials). Listan tyypiksi valittiin Values, jolloin komponenttiluettelo muodostuu kappalemäärien perusteella. Listan muodoksi valittiin CSV, jonka voi avata taulukkolaskentasovelluksessa. BOM-työkalu on kuvassa 24. Komponenttiluettelo muutettiin piirilevyvalmistajan tarvitsemaan muotoon taulukkolaskentaohjelmassa. Valmis komponenttiluettelo on liitteenä 2.



Kuva 24. Komponenttiluettelon vienti.

4 LAITEOHJELMISTON TOTEUTUS

Sulautettu järjestelmä tarvitsee laitteistototeutuksen lisäksi ohjelmiston mikrokontrollerille. Laiteohjelmiston tehtävänä on mikrokontrolleriin kytkettyjen komponenttien ohjaaminen ja rajapintojen tarjoaminen oheislaitteille sekä tiedonsiirtoon. Laiteohjelmistot toteutetaan nykyään esimerkiksi C- tai C++ -kielellä ohjelmoimalla. Mikroprosessorien valmistajat tarjoavat käyttöön omia työkalujaan, jotka on yleensä yhdistetty kehitysympäristöiksi. Kehitysympäristöt sisältävät vähintään koodieditorin, kääntäjän ja virheenjäljitystyökalut.

Mikrokontrollerien laiteohjelmistot voidaan toteuttaa joko kovakoodattuna tai reaaliaikakäyttöjärjestelmän (RTOS) avulla. Kovakoodatuissa ohjelmistoissa jokaista ohjelman funktioksi kirjoitettua tehtävää kutsutaan vuorotellen. RTOS ohjaa tehtävien suoritusta siten, että jonkin tehtävän ollessa käynnissä voidaan siirtyä suorittamaan toista korkeamman prioriteetin tehtävää ja palata takaisin edelliseen tehtävään.

4.1 Laiteohjelmiston vaatimusmäärittely

Laiteohjelmistolle on määriteltävä sen tehtävät, joiden perusteella laiteohjelmisto suunnitellaan ja ohjelmoidaan. Tehtävälista tehdään laiteohjelmiston vaatimusmäärittelyn avulla, jossa tehtävien lisäksi kerrotaan tehtävien käyttämät mikrokontrollerin toiminnot ja jännite- tai taajuusalueet, joilla toimintojen tulee toimia. Sen lisäksi, että vaatimusmäärittelyssä todetaan toteutuksen reunaehdot, se toimii myös apuvälineenä ohjelmointityössä, kun mikrokontrollerin tulo- ja lähtöarvoja voidaan verrata suunniteltuihin arvoihin.

Laiteohjelmistolle asetetut vaatimukset perustuvat luvussa 2.1 esitettyyn laitteen vaatimusmäärittelyyn. Laiteohjelmiston on kyettävä ohjaamaan jänniteohjattua oskillaattoria D/A-muuntimen ja operaatiovahvistimen kautta I²C-väylän avulla. Perustaajuus I²C-väylällä on 100 kHz [29]. Ilmaisimelta tuleva mittaussignaali on analoginen, joten ohjelmiston on osattava tehdä sille A/D-muunnos. Samoin A/D-muunnos on tehtävä ilmaisimen lämpötilasignaaliin ja akkujännitteelle. Akkujännitettä saa lukea tiheimmillään 2,5 s välein. Mittausdata on lähetettävä Bluetooth-yhteyden kautta eteenpäin esim. mobiililaitteelle tai kannettavalle tietokoneelle. Laiteohjelmiston vaatimukset on esitetty taulukossa 6.

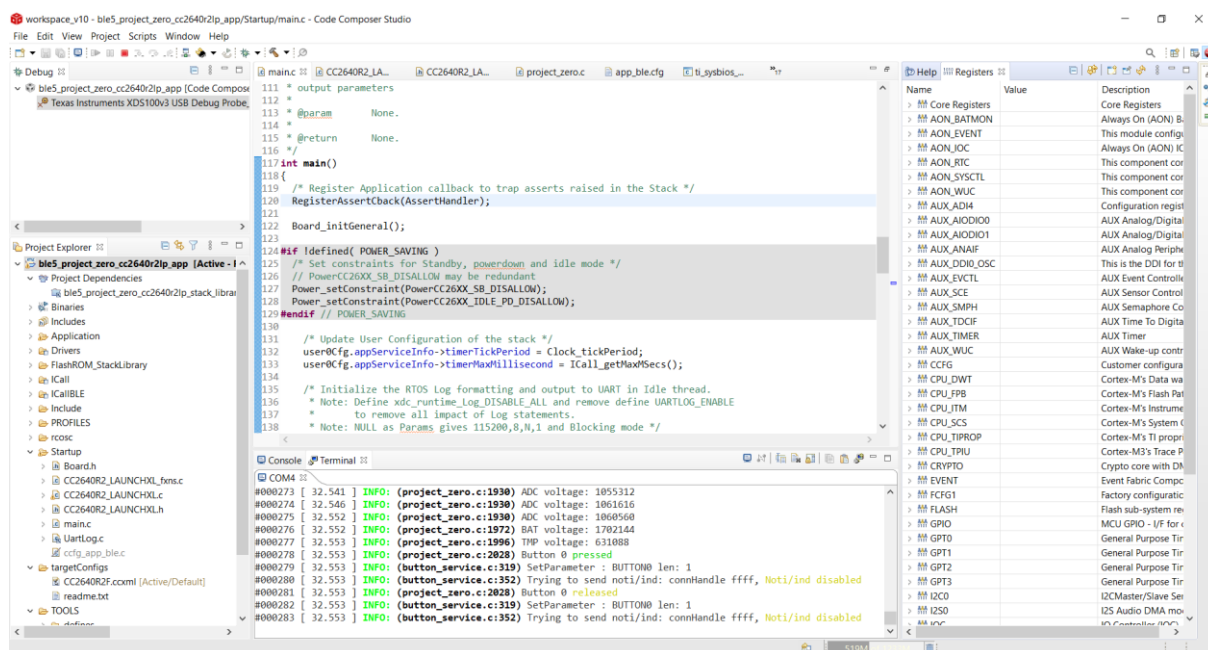
Taulukko 6. Laiteohjelmiston vaatimusmäärittely.

Tehtävä	Toiminto	Arvot
Tiedonsiirto	Bluetooth	BLE, Bluetooth Low Energy
D/A-muuntimen ohjaus	I ² C-väylä	f = 100 kHz
Mittaustuloksen luku	A/D-muunnos	0,6 V - 1,4 V, 8 bittiä
Lämpötilan luku	A/D-muunnos	n. 0,6 V
Akkujännitteen luku	A/D-muunnos	1,35 V - 2,1 V, lukuväli > 2,5 s

4.2 Kehitysympäristö ja debugger

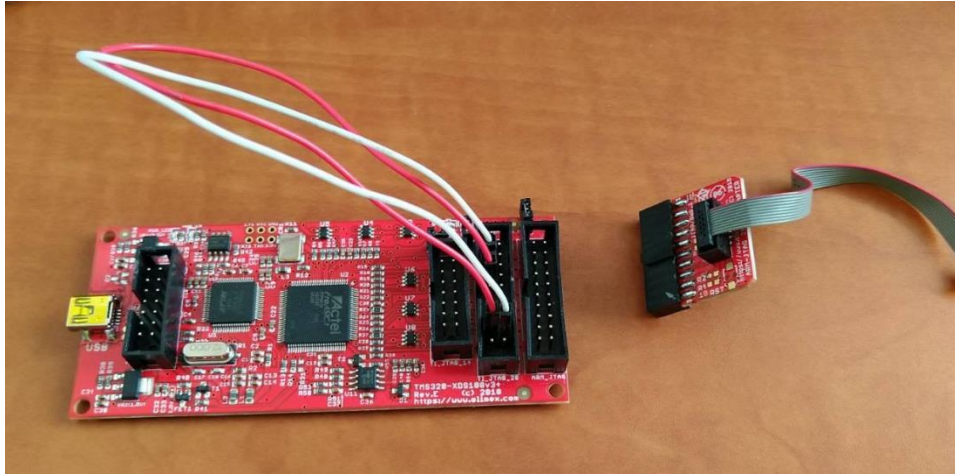
Texas Instruments tarjoaa valmistamiensa mikrokontrollerien ohjelmistojen kehittämiseen Code Composer Studio (CCS) -kehitysympäristöä eri Linux-, Windows- ja macOS-käyttöjärjestelmiin [30]. Ohjelmisto sisältää koodieditorin, kääntäjän ja virheenjäljitystyökalut. Lisäksi CCS:ssa saa käyttöön kattavat opiskelumateriaalit esim. SimpleLink Academyn kautta ja ohjelmistokehityspaketit eli SDK:t. Prototyypissä käytettävälle CC2640R2F-piirille

kehitysympäristössä on saatavilla oma SDK-pakettinsa. CCS:n käyttöliittymä on esitetty kuvassa 25.



Kuva 25. Code Composer Studio käyttöliittymä.

Kehitysympäristön lisäksi mikrokontrollerin ja tietokoneen väliin tarvitaan JTAG-protokolla käyttävä ohjelmointilaite, jolla laitteen debuggaus ja tarvittaessa myös osittainen testaus onnistuu [31]. CC2640R2F tukee sekä 4-pinnisen JTAG-liitännän että kahta pinniä käyttävän cJTAG-liitännän käyttöä [6]. cJTAG-liitännässä hyötynä on se, että JTAG-liitännän kaksi pinniä jää vapaaksi ohjelmointilaitteen kautta kulkevalle UART-sarjaliikenteelle [32]. Yksi cJTAG-liitäntää tukeva ohjelmointilaite on XDS100v3, jota nykyisin valmistaa esim. Olimex ja myy noin 55 euron hintaan [33]. TI valmistaa uudempaa XDS110-mallia, jonka hinta jakelijoilla on noin 110 euroa. Tähän työhön valittiin käyttöön XDS100v3. Lisäksi tarvittiin adapteri 20-pinnisestä 2,54 mm pinnijaollisesta liittimestä 10-pinniseen 1,27 mm pinnijaolliseen liittimeen. Olimexin XDS100v3 ja adapteri ovat kuvassa 26.



Kuva 26. Olimexin XDS100v3 ja 10-pin adapteri.

5 LAITTEEN TESTAUS JA KÄYTTÖÖNOTTO

Laitteen käyttöönotto edellyttää koko laitteen kattavaa testausta. Prototyypin testauksen tarkoituksena on löytää suunnittelun aikana tapahtuneet ja huomaamatta jääneet virheet sekä tuotantoprosessin aikana syntyneet viat. Sulautettujen järjestelmien testaus edellyttää joko valmista testausohjelmistoa tai testaukseen soveltuvan ohjelmakoodin kirjoittamista kehitettävälle laitteelle.

Valmistettavalle laitteelle on tehtävä testaussuunnitelma, jonka mukaan piirilevyllä olevien komponenttien ja kytkentöjen toiminta testataan osa kerrallaan. Prototyypin testaus alkaa visuaalisella tarkastelulla ja mittauksilla, joilla pyritään varmistamaan, ettei piirilevyllä ole oikosulkuja, väärinpäin olevia napaisuuksia tai puuttuvia ja vääriä komponentteja [28]. Tämän jälkeen kytketään käyttöjännite, mitataan jännitetasot ja suoritetaan yksikkötestaus tarvittaessa laiteohjelmistoa apuna käyttäen.

Prototyypille tehtiin taulukossa 7 esitetty testaussuunnitelma, jossa käydään laitteen osat moduuleittain läpi. Ensin tarkastettiin suurennuslasin avulla juotokset kylmien juotosten ja irtonaisten komponenttien jalkojen varalta. Komponenttien arvot tarkastettiin niiltä osin, kun se on komponenttien paikallaan ollessa mahdollista. Seuraavaksi yleismittarilla mitattiin johtavuus akkulaturin tulon ja maan, akkuliittimen napojen väliltä sekä jännitelähteiden lähtöjen ja maan väliltä. Oikosulkuja ei ollut näissä kohdissa.

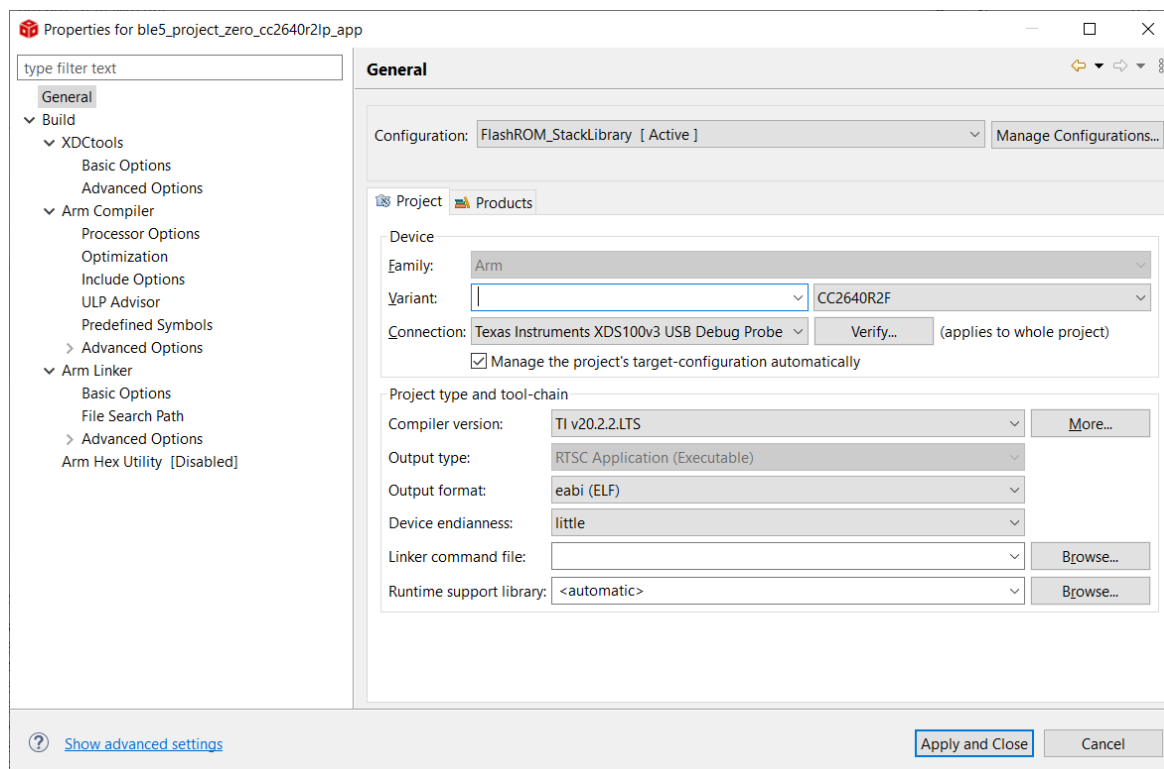
Jännitteettömien mittausten jälkeen kytkettiin 3,7 V akkujännite, jollin mikrokontrollerin ohjaama LED2 syttyi himmeästi. Tässä vaiheessa voitiin mitata ainoastaan 3,3 V käyttöjännite, koska 5 V ja 12 V jännitelähteitä ei vielä ollut ohjattu päälle laiteohjelmistolla. Vielä testattiin akkulaturin toiminta. Kytkettäessä 5 V USB-C-liittimeen LED1 syttyi ja akulle muodostui latausjännite.

Taulukko 7. Prototyypilaitteen testaussuunnitelma.

Número	Testi	Hyväksyttävä tulos
1	Juotokset	Ei kylmiä tai puuttuvia juotoksia
2	Puuttuvat komponentit	Ei puuttuvia komponentteja
3	Komponenttien arvot ja napaisuudet	Komponentit vastaavat suunnitelmaa
4	Oikosulut	
4.1	- akkujännite	$R \neq 0$
4.2	- latausjännite	$R \neq 0$
4.3	- 3,3 V	$R \neq 0$
4.4	- 5,0 V	$R \neq 0$
4.5	- 12 V	$R \neq 0$
5	Jännitelähteet	
5.1	- 3,3 V	$U = 3,3 \text{ V}$
5.2	- 5,0 V	$U = 5,0 \text{ V}$
5.3	- 12 V	$U = 12 \text{ V}$
6	Virrankulutus	Piirilevyn virta alle 100 mA
7	Akkulaturi	LED1 syttyy, akulle tulee latausjännite
8	Mikrokontrolleri	MCU käynnistyy, JTAG-yhteys ok
8.1	- UART JTAG-liitännän kautta	UART-yhteys toimii
8.2	- Bluetooth	BLE-laite löydettävissä ja yhdistettävissä
8.3	- I/O-pinnit	LED2 ohjautuu, S1 toimii kytkimenä
9	D/A-muunnin	I^2C -väylä toimii, lähtöjännite 0 V - 3,3 V
10	Operaatiovahvistin	Lähtöjännite 0 V - 10 V
11	Oskillaattorin ohjaus	Mosfet-kytkentä toimii kytkimenä
12	Jänniteohjattu oskillaattori	VCO:n lähtö toimii
13	Ilmaisin	AD8318:n lähtöjännite ok
14	A/D-muuntimet	
14.1	- ilmaisimen tulosa signaali	A/D-muunnos toimii MCU:lla
14.2	- ilmaisimen lämpötilasignaali	A/D-muunnos toimii MCU:lla
14.3	- akkujännitteen mitta	A/D-muunnos toimii MCU:lla

5.1 Moduulien testaus, ohjaus ja mittaustulokset

Ensimmäisenä tehtävänä oli saada UART-yhteys cJTAG-liitännän kautta toimimaan laiteohjelmiston avulla. SDK-kirjastosta ladattiin ja avattiin Uartecho-niminen esimerkki. Nimensä mukaisesti se ottaa UART-väylän kautta merkkejä vastaan ja kaiuttaa ne takaisin lähettäjälle. Ennen UART:n käyttöä XDS100v3:een tuli tehdä muutoksia, jotta UART-signaali kulkisi debuggerin läpi tietokoneelle. Jumperit J5 ja ARM_JTAG_E suljettiin ja J4 avattiin. Lisäksi liittimessä TI_JTAG_20 kytkettiin toisiinsa pinnit 18 (EMU3) ja 3 (TDI) sekä 17 (EMU2) ja 7 (TDO). UART-liikenne siis kulkee JTAG-liittimen TDI- ja TDO-pinnien kautta. Esimerkkikoodista piti poistaa käytöstä ylimääräiset pinnit ja flash-muistin ohjaus. Projektin käännösasetuksista (Build Settings) tuli määrittää oikea debugger käyttöön oletuksena olevan XDS110:n tilalle. Debuggerin asetukset on esitetty kuvassa 27.

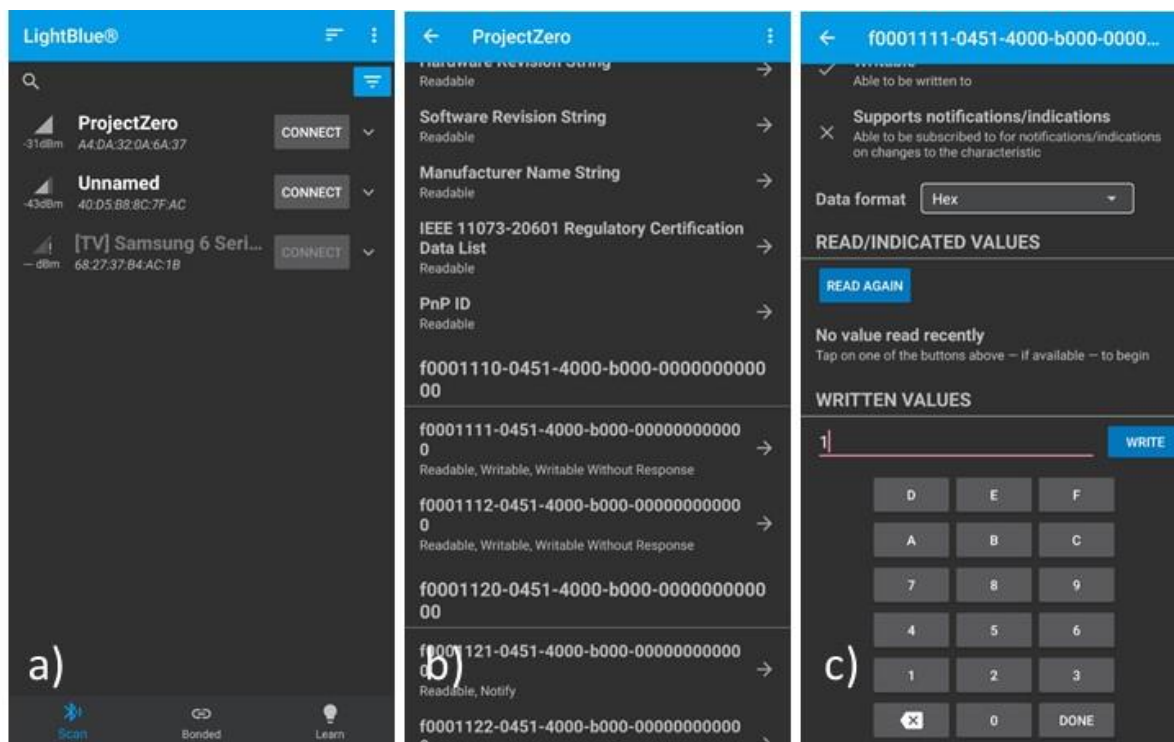


Kuva 27. Debuggerin tyypin määrittäminen projektin asetuksissa.

Bluetoothin testaamiseen soveltuva esimerkkiprojekti on nimeltään Project Zero, joka on suunniteltu CC2640R2 LaunchPad –alustalle. Se tulostaa tilailmoituksia UART-väylän kautta, ottaa näppäinpainalluksia vastaan ja ohjaa ledejä Bluetooth-yhteyden kautta. Project Zero toimii TI-RTOS-käyttöjärjestelmässä ja hyödyntää sen kirjastoja ja funktioita.

Käytössä oli SimpleLink SDK:n versio 4.40.00.10 ja siihen liittyvä Project Zero. Project Zeron kehitysympäristöön lataamisen jälkeen tehtiin vastaavat toiminnot kuin Uartechon kanssa. Pinnien määrittäykset muutettiin tiedostossa CC2640R2_LAUNCHXL.h vastaamaan prototyypilevyn kytkentöjä ja ylimääräiset pinnit muutettiin tilaan PIN_UNASSIGNED. Koska Bluetooth-antennin oli kytketty differentiaalisesti sisäisellä biasoinnilla, antennin sovitusta kuvaavan symbolin oletusarvo CC2650EM_7ID oli sopiva. Flash-muisti poistettiin käynnistyksestä tiedoston CC2640R2_LAUNCHXL_fxns.c lopussa olevasta Board_initHook()-funktioista. Piirilevyä suunnitelmassa oli päätetty, että käytetään mikrokontrollerin sisäistä 32 kHz oskillaattoria. Sen vuoksi kopioitiin sisäisen oskillaattorin vaatimat tiedostot ja tehtiin koodiin muutokset SDK:n ohjeen [34] mukaan.

Ohjelma käännettiin, aloitettiin debug-istunto ja aloitettiin ohjelman suoritus. Android-puhelimeen ladattiin LightBlue-sovellus, jolla pääsee operoimaan BLE-laitteiden kanssa. Project Zero oli löydettävissä ja siihen sai muodostettua yhteyden. F0001111-alkuisesta karakterista (characteristic) LED1:n sai kytkettyä päälle ja pois. F0001121-alkuinen karakteri taas raportoi piirilevyllä olevan kytkimen tilan. Kuvassa 28 a) Project Zero näkyy LightBlue-sovelluksessa. Kuvassa 28 b) karakteri on valittavissa ja kuvassa 28 c) lähetetään karakterille arvo 1, joka ohjaa LED2:n päälle.



Kuva 28. a) Project Zero yhdistettävissä LightBlue-sovelluksessa b) UUID:t näkyvissä LightBlue-sovelluksessa ja c) arvo 1 lähetetään BLE:n kautta LED1:n ohjaukseen.

Erillisenä D/A-muuntimena on DAC5571, jota ohjataan I²C-väylällä. D/A-muuntimen ohjaukseen tarvitaan tieto piirin osoitteesta väylällä ja datatavujen rakenteesta. Datalehden mukaan DAC5571:n 7-bittinen osoite on pinnin A0 ollessa kytkettynä maahan 1001100, joten sitä vastaava heksadesimaaliarvo on 0x4C. Seuraavassa tavussa ensimmäiset neljä bittiä ovat ohjausdataa (oletuksena nollia) ja toiset neljä bittiä ensimmäinen puolikas datatavusta. Kolmannessa tavussa siirretään datatavun jälkimmäinen puolikas ja neljä nollaa. [29]

TI-RTOS:ssa on valmiina ajuri I²C-väylän käyttöön. Dokumentaatio I²C-ajurin käyttöön on SDK:n tiedostossa source/TI/drivers/I2C.h. Näiden ohjeiden perusteella kirjoitettiin funktio DAC5571:n ohjaukseen. Ensin avattiin I²C-väylä, jonka jälkeen muodostettiin kirjoituspuskuri ja sen sisältö. Osoitetavu jaettiin puoliksi bitinsiirto-operaatioilla. Ajurille annettiin D/A-muuntimen osoite ja sille kerrottiin, montako tavua lähetetään. Kuvassa 29 on esitetty funktio, jonka parametrina on D/A-muuntimen jännitelähdön arvo välillä 0 - 255.

```

void WriteOscVoltage(uint8_t int_value)
{
    I2C_Handle i2c;
    i2c = I2C_open(Board_I2C0, NULL);
    if (!i2c) {
        Log_info0("I2C open error");
    }

    //Initialize write buffer
    uint8_t i2writeBuffer[2];
    //Divide voltage byte into two data bytes
    i2writeBuffer[0] = int_value >> 4;
    i2writeBuffer[1] = int_value << 4;

    I2C_Transaction i2cTransaction;
    i2cTransaction.slaveAddress = 0x4C;
    i2cTransaction.writeBuf = i2writeBuffer;
    i2cTransaction.writeCount = 2;
    i2cTransaction.readBuf = NULL;
    i2cTransaction.readCount = 0;

    //Do transfer and check if it succeeded
    if (!I2C_transfer(i2c, &i2cTransaction)) {
        Log_info0("I2C transfer error");
    } else {
        // Enable for debugging
        //Log_info1("I2C byte2: %x", i2writeBuffer[1]);
    }
    I2C_close(i2c);
}

```

Kuva 29. D/A-muuntimen ohjausfunktio.

D/A-muuntimen toimivuus varmistettiin tekemällä funktiolle silmukka parametrin arvoilla 0–255. Kun silmukkaa ajettiin tarpeeksi hitaasti, saatiin luettua D/A-muuntimen lähtöjännitteet yleismittarilla. Samoin mitattiin jännitteet operaatiovahvistimen lähdöstä, jolla ohjataan oskillaattoria. Jänniteohjatun oskillaattorin toiminta varmistettiin spektrianalysaattorilla.

Logaritminen ilmainen AD8318 tuottaa käyttöalueella -40 dBm - (-10 dBm) taajuuden 5,8 Ghz ympäristössä jännitteen välillä 0,86 V - 1,59 V [26]. Mikrokontrollerilla on siis tehtävä A/D-muunnos ilmaisimen jännitteelle. SDK:ssa on kolme tiedostoa, joissa on ohjeistusta sisäänrakennettujen A/D-muuntimien käyttöön: ADC.h, ADCCC26XX.h ja ADCBufCC26XX.h. Ensin muutettiin tiedostosta CC2640R2_LAUNHCXL.c AD-muuntimien käyttämät pinnit oikeiksi ja poistettiin käytöstä ylimääräiset IOID_UNUSED-symbolilla. Komparaattori B:n AUXIO-porttien numeroinnin löytäminen teetti ylimääräistä työtä, koska se oli merkitty puskuroidun A/D-muunnoksen tiedostoon ADCBufCC26XX.h. Väärillä komparaattorien numeroilla jännitteiden skaalaus antoi vääriä lukemia.

SDK:n ohjeistuksen perusteella kirjoitettiin funktio jännitteen lukemiseen AD-muuntimelta. Ensin alustettiin muuttujat muuntimelta tulevalle raakaluvulle ja siitä muunnettavalle

mikrovolttilukemalle sekä muuntimen ajurille. A/D-muunnos otettiin käyttöön muuntimelle ADC7, jolle pinni 5 oli aiemmin määriteltä. Jos A/D-muuntimen avaus onnistui, tehtiin muunnos ja muutettiin saatu arvo mikrovolteiksi. Lopuksi tulostettiin jännite mikrovolteina lokiin, joka näkyy UART-väylän kautta. Funktio on esitetty kuvassa 30.

```
void ReadADVoltage() {
    uint16_t adcValue;
    uint32_t adcVoltage;

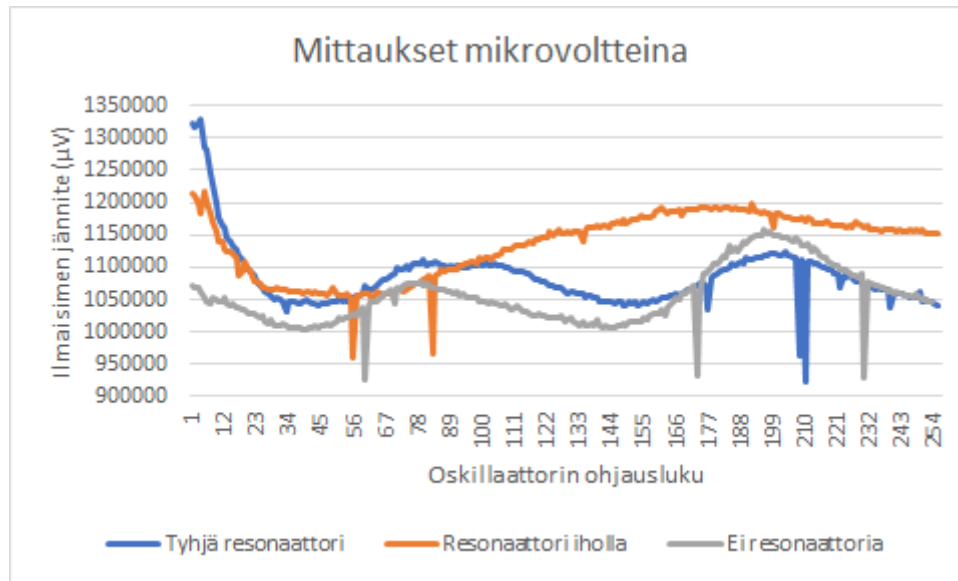
    ADC_Handle adc;
    ADC_Params params;
    int_fast16_t res;

    // Initializing ADC, opening ADC7
    ADC_Params_init(&params);
    ADC_init();
    adc = ADC_open(CC2640R2_LAUNCHXL_ADC7, &params);

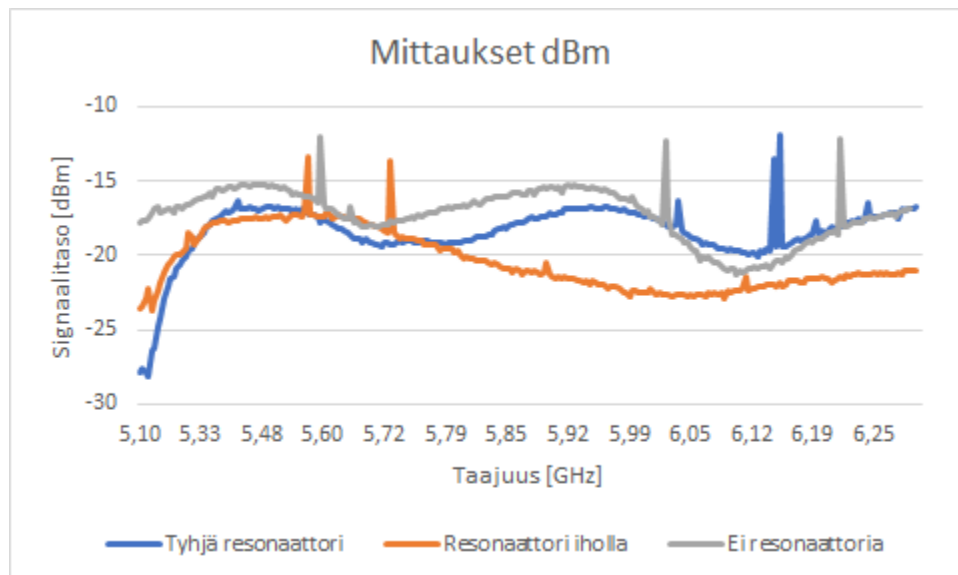
    if (adc == NULL) {
        Log_info0("ADC init error");
    } else {
        res = ADC_convert(adc, &adcValue);
        if (res == ADC_STATUS_SUCCESS) {
            // Log_info1("ADC voltage: %d", adcValue);
            adcVoltage = ADC_convertToMicroVolts(adc, adcValue);
            Log_info1("ADC voltage: %d", adcVoltage);
        } else {
            Log_info0("ADC convert error");
        }
        ADC_close(adc);
    }
}
```

Kuva 30. A/D-muuntimen näytteenotto ja muuntaminen.

Näillä funktioilla saatiin todettua oskillaattorin ja ilmaisimen toiminta yksittäisillä taajuus-jänniteyhdistelmillä. A/D-muunnokset ilmaisimen lämpötilasignaalille ja akkujännitteelle tehtiin samankaltaisesti. Oskillaattorin ja ilmaisimen funktiokutsut siirrettiin silmukkaan, joka käy läpi arvot 0 - 255. Näin saadaan pyyhkäistyä koko oskillaattorin taajuusalue läpi. Tuloksena saatiin lokissa näkyvä jännitteiden sarja, josta ote näkyy kuvassa 31. Mittaussarja ajettiin ilman resonaattoria, resonaattori ilmassa ja resonaattori sormenpäässä. Jännitearvot siirrettiin taulukkolaskentaohjelmaan, jolla luotiin kaavio mittaus tuloksista. Mittauspisteet muunnettiin taajuuksiksi ja jännitteet teholukemiksi datalehtien ominaiskäyristä johdettujen kaavojen avulla. Kuvasta 32 nähdään, että ilman resonaattoria ja resonaattori ilmassa tehdyt mittaukset ovat lähellä toisiaan, mutta sormenpäässä pidetyllä resonaattorilla vaimentuma on suurimmillaan noin kuuden gigahertsin kohdalla.



Kuva 31. Mittaukset mikrovoltteina.



Kuva 32. Mittaukset muunnettuna.

5.2 Bluetooth Low Energy

Mikrokontrolleri CC2640R2F:n Bluetooth-moduuli käyttää Bluetooth Low Energy (BLE) -protokollaa [6]. Protokolla on suunniteltu erittäin pienitehoisiin sovelluksiin ja siinä voi käyttää useita tiedonsiirtonopeuksia sekä lähetystehoja [35]. Texas Instrumentsin SimpleLink SDK sisältää BLE5-pinon (BLE5-Stack), jota työssä käytettiin. Esimerkkiohjelma Project Zero käyttää BLE5-pinoa.

A/D-muunnos antaa jännitearvon mikrovoltteina, joka tarkoittaa seitsemää numeroa ja 32-bittistä muuttujaa. BLE:ssä data siirretään 8-bittisinä tavuina, joten datan siirtoon oli kehitettävä algoritmi. Ensimmäinen muunnosyritys tehtiin kasvattamalla lähetyspuskurin rivin kokoa niin paljon, että koko mittaustulos olisi mahtunut siihen tavun kappaleissa. Puskurin rivin koon

kasvattaminen 1024:ään johti muistin loppumiseen mikrokontrollerilla, jonka muistista suurimman osan vei Project Zero. Ratkaisuna tähän poistettiin käytöstä tarpeettomia BLE-attribuutteja ja palveluita sekä pienennettiin A/D-muunnosjännitteen tarkkuutta. BLE-palveluista poistettiin käytöstä ledin tilan ilmaisu ja toinen painonappi, jota prototyyppilevyllä ei ole. AD-muunnosjännitteen tarkkuutta pienennettiin kahdella merkitsevällä numerolla, jolloin saatiin vielä mittauksen kannalta riittävä tarkkuus ja jännitearvot mahtuivat kahteen tavuun. Lähetysohjelmien rivin kooksi riitti näin ollen 512 tavua. Samalla tehtiin mittaukselle oma BLE-palvelu ProjectZeron DataServicen perusteella.

A/D-muunnosjännite sijoitettiin lähetysohjelmien siten, että ensimmäiset tavut tallennettiin ohjelmien alkuun ja viimeiset tavut ohjelmien loppuun. Ensimmäinen tavu saatiin 16-bittisestä muuttujasta siirtämällä kahdeksan bittiä oikealle. Toinen tavu muodostettiin ja-bittioperaatiolla. Kuvassa 33 on esitetty silmukassa ajettavat muunnos- ja palautusalgoritmit. Android-laitteessa LightBlue-sovelluksen näkemä data heksadesimaalilukuina on kuvassa 34.

```
// conversion from 32-bit uV to two 8-bit bytes
adcVoltage[int] = adcUVoltage2/100 >> 8;
adcValue3[int+256] = adcValue2/100 & 0xFF;

// restoring uVolts
UVoltageRestored = ((adcValue3[int] << 8) | adcValue3[int+256])*100;
```

Kuva 33. A/D-muunnetun jännitteen skaalaus ja sovitus.



```
← f0001141-0451-4000-b000-0000...
BE 32 31 31 30 2F 2D 2D 2C 2C 2B 2B 2B 2B
2A 2A 29 29 29 29 29 28 28 28 28 28 28 27
27 27 27 27 27 27 27 27 27 27 26 27 27 27
27 27 27 27 27 27 27 27 27 27 27 28 28
28 28 28 28 28 28 29 29 29 29 29 29 29 29
29 29 29 29 29 29 29 29 28 29 28 28 28 28
28 28 28 28 28 28 28 28 28 28 28 28 28 28
28 28 28 27 27 27 27 27 27 27 27 27 27 27
27 27 27 27 27 27 27 26 26 26 26 26 26 26
26 26 26 26 26 26 27 27 26 27 27 27 27 27
27 27 27 28 27 27 27 28 28 28 28 28 28 28
28 28 29 29 29 29 29 29 29 29 2A 2A 2A 2A
2A 2A 2A 2A 2A 2A 2A 2A 2A 2A 2A 2A 2A 2A
2A 2A 2A 2A 2A 2A 2A 2A 29 29 29 29 29 29
29 29 29 29 28 28 28 28 28 28 28 28 28 28
28 28 28 28 27 27 27 27 27 27 27 27 27 27
27 27 27 27 27 27 27 27 27 27 26 27 27 26
26 26 26 26 26 01 03 05 03 08 01 0B 08 00 0C
03 05 00 01 0E 0F 06 0C 03 03 0F 00 05 06 0C
0C 07 0D 03 04 0F 00 05 06 00 06 06 01 06 06
04 0B 0B 0B 0B 0B 0B 00 05 00 05 0F 0F 0A
0E 09 0E 08 02 0C 0C 0B 06 0B 0B 04 0F 09 0E
0D 08 03 0E 08 0D 0D 08 0E 03 09 04 0E 04 0A
0E 05 0A 05 00 0B 00 0B 0B 01 01 06 06 06 06
07 07 0C 02 0D 07 0D 03 0E 0E 09 0E 0E 09 04
0A 05 05 05 06 05 00 01 06 0C 06 01 0C 07 02
0D 07 02 07 02 02 0D 02 0D 02 02 02 07 0C
0C 01 0C 06 01 0B 06 0A 0F 0D 04 03 03 03
0D 02 07 06 00 0B 00 0F 0E 0C 03 08 07 0C 0C
0B 0B 00 05 04 04 09 0E 09 09 03 0E 03 0E 03
09 09 04 09 04 04 0A 0A 05 05 00 05 0B 06 0C
0D 02 07 0D 09 09 03 09 05 0B 00 0B 01 07
0C 07 07 02 0D 08 03 04 0E 0E 0F 0F 0A 0F 0A
0A 06 05 06 0B 0B 06 06 06 0C 0C 0C 01 0C
08 0C 02 07 02 0D 08 03 03
```

Kuva 34. Yhden mittauksen jännitteet LightBlue-sovelluksessa.

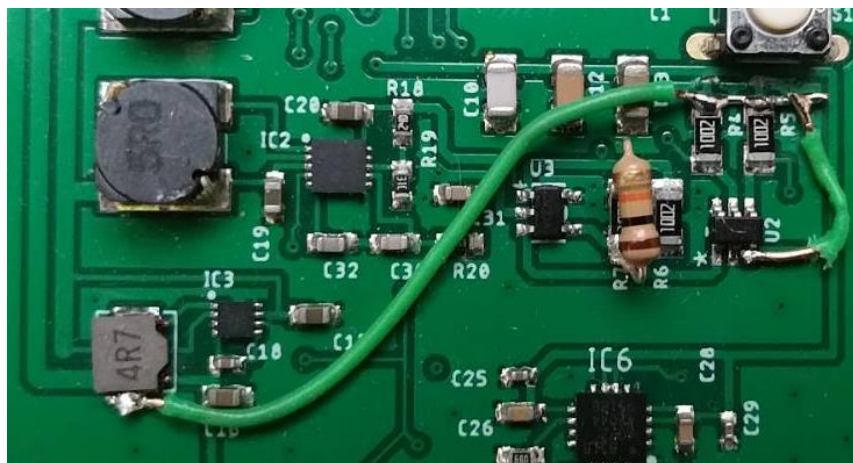
Mittauksen käynnistäminen toteutettiin muokkaamalla valmiina ollutta ButtonService-palvelua siten, että mittaus käynnistyi lähettämällä karakterille numeron 1. Akkujännite ja ilmaisimen lämpötilatieto tallennettiin mittauksen yhteydessä RFService-palvelun karaktereihin.

5.3 Kehitystyössä havaitut poikkeamat

Prototyyppejä tehdään, jotta suunnitteluvirheet ja bugit tulisivat esille ennen sarjatuotantoa [35 s. 596]. Niinpä on tavanomaista, että prototyypivaiheessa löytyy korjaamista vaativia suunnitteluvirheitä, kuten kytkentöjä, jotka toimivat eri tavalla kuin suunnittelupöydällä. Pahimmillaan virheet voivat vaatia uuden prototyypin suunnittelun ja valmistamisen.

Suunnitteluvirheiltä ei välttytty tässäkin projektissa. Piirilevyjen valmistuttua tuotannosta piirilevyjen toimittaja ilmoitti, että USB-C-liitin ei mahdu paikalleen, koska piirilevyssä on liian pienet reiät tukijaloille. Vika johtui komponenttikirjastosta ladatusta symbolista, jossa tukijalkojen reiät oli mitoitettu liian pieniksi. Virhe korjattiin koottujen piirilevyjen saavuttua leikkaamalla tukijalkoja kapeammiksi.

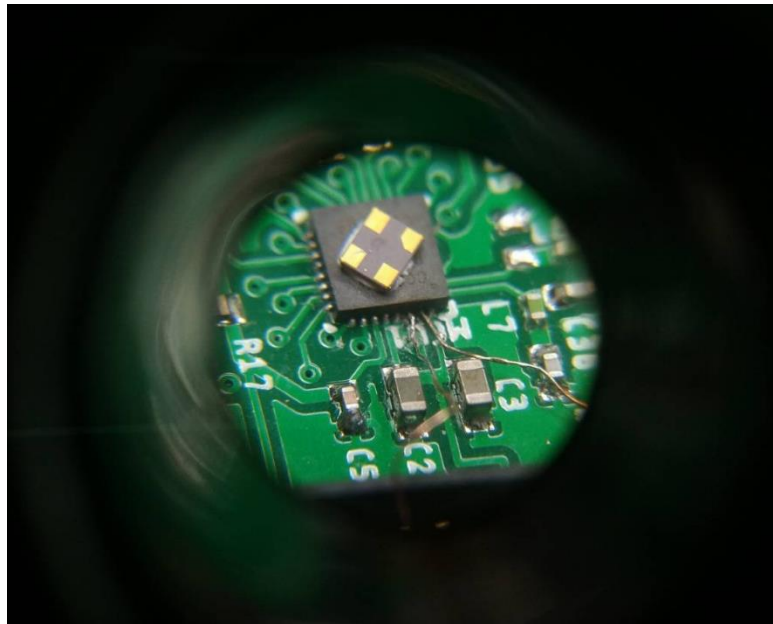
Myös komponenttinvirheitä esiintyi. Suunnitteluvaiheessa oli jäänyt muuttamatta D/A-muuntimen käyttöjännite 5 voltista 3,3 volttiin. Koska käyttöjännite määrää I²C-väylän jännitetason ja 5 V ylitti mikrokontrollerin maksimijännitteen, oli jännitetasoa laskettava. Se onnistui katkaisemalla kuparointi ja lisäämällä hyppylanka jännitelähteen kelan ja D/A-muuntimen käyttöjännitteen välille. D/A-muuntimen lähtöjännitteen pienentyessä täytyi myös operaatiovahvistimen kerrointa muuttaa rinnankytketyllä vastuksella. Koska vahvistuskerroin oli alun perin 2 ja vastukset 10 k Ω + 10k Ω , saatiin kerroin muutettua 3:ksi lisäämällä toinen 10 k Ω vastus takaisinkytkentävästuksen rinnalle. Korjaukset on esitetty kuvassa 35. Lisäksi 3,3 V jännitelähteen suunnitelmaan oli jäänyt liian suuri kela. Kelan induktanssi oli 4,7 μ H, kun suositeltava kela oli 1,0 μ H. Jännitelähde kuitenkin toimi maksimikuormalla toivotusti.



Kuva 35. D/A-muuntimen käyttöjännitteen korjaus.

Hankalimpana suunnitteluvirheenä oli 24 MHz kiteen puuttuminen kokonaan. Tämä kide tarvitaan Bluetooth-yhteyden käyttöön, joten se oli lisättävä tavalla tai toisella. Kiteen lisäämistä ei helpottanut, että mikrokontrollerin jalat olivat 0,1 mm leveitä ja 0,3 mm etäisyydellä toisistaan [6]. Valaisevalla suurennuslasilla ja sopivan työasennon löydyttyä kiteen juottaminen kuparilangoilla mikrokontrollerille kuitenkin onnistui. Ennen juottamista kide

liimattiin mikrokontrollerin päälle ja juottamisen jälkeen lankojen vedonpoisto toteutettiin liimalla. Kuvassa 36 nähdään luupin läpi kuparilangat mikrokontrollerille juottamisen jälkeen.



Kuva 36. Mikrokontrollerille juotetut kuparilangat.

6 POHDINTA

Työssä suunniteltiin ja toteutettiin tavoitteen mukaisesti integroitu RF-mittalaite kudoksen nestetasapainon mittaukseen. Mittaustapahtumassa saatu tulos myötäilee laboratorioolosuhteissa saatuja tuloksia resonaattorista ja kudoksenkaltaisesta materiaalista, vaikka yhtä jyrkkäreunaista signaalin vaimentumaa ei saatu muodostettua. On mahdollista, että mittaustulokseen vaikuttaa piirilevyn johdotuksien pituus, vaikka RF-komponenttien johdotukset pyrittiin pitämään mahdollisimman lyhyinä.

Työ tarjosi mahdollisuuden tutustua uusiin teknologioihin, joiden käyttämisestä ei ollut aikaisempaa kokemusta. Näihin lukeutuvat ohjelmistopuolella reaaliaikakäyttäjärjestelmä ja Bluetooth Low Energy –protokolla. Rautapuolella RF-suunnittelun vaatimuksiin tutustuminen toi mukanaan uutta opittavaa ja antennin sovittaminen mikrokontrollerin lähtöön tuli konkreettisesti tutuksi. Työtä tehdessä sai opetella käyttämään uutta mikrokontrollerisarjaa, vaikka ohjelmointiperiaatteet itsessään olivat hyvin samankaltaisia toisen valmistajan piirin kanssa. Huomionarvoista oli, kuinka hyvin erilaisia esimerkkejä ja dokumentaatiota on olemassa ainakin käytetyille mikrokontrollerisarjalle.

Prototyypin tarkeys yhtenä tuotekehityksen vaiheena tuli selkeästi ilmi, kun suunnitteluvirheet saatiin korjattua prototyypin vaiheessa. Myös integraation toimivuutta päästiin testaamaan prototyypin avulla. Pienet ongelmat saatiin korjattua käsityönä eikä tapahtunut sitä, että koko piirilevy olisi pitänyt hylätä tehdyn suunnitteluvirheen takia. Suunnitteluvaiheessa ensimmäinen valittu komponentti ei välttämättä ollut paras mahdollinen, vaan suunnittelutyön edetessä esimerkiksi jännitelähdepiireille löytyi eri vaihtoehtoja, joista käyttöön valittiin tarkoituksenmukaisimmat.

Seuraavassa mahdollisessa prototyypissä levyille voisi lisätä useampia ledejä merkkivaloiksi eri käyttäjännitteisiin ja komponenttien aktivointisignaaleihin. Erilliset mittapisteen helpottaisivat tarkastusmittauksien tekemistä, kun mittapää saisi tukevasti piirilevylle komponenttien päiden sijaan. USB-C-liittimen symboli vaatii korjaamista tukijalkojen reikien koon osalta. 3,3 V jännitelähde saisi olla buck-boost-tyyppinen nykyisen buck-tyypin sijaan, jotta akun varauksen voisi hyödyntää täysimääräisesti. Mikrokontrollerin ja laturin tulopinneihin olisi mahdollista lisätä ylijännitesuojaukset johtimiin indusoituvien jännitteiden varalta.

Mittalaitteen lisäksi tarvitaan vielä mobiilisovellus, jotta koko mittauskonseptia voidaan testata aidossa käyttöympäristössä. Silloin nähdään, kuinka kauan mittalaitetta on opetettava tunnistamaan käyttäjänsä kehossa tapahtuvat nestetasapainon muutokset. Mobiilisovellus voisi ajaa mittauksen useampaan kertaan, jolloin saataisiin suodatettua pois yksittäiset virhepiikit mittauskäyrissä. Mobiilisovelluksen kautta mittausdata voitaisiin siirtää verkkopalveluun, joka säilyttää mittaustulokset ja tekee analyysejä niiden perusteella. Laitteen jalostaminen IoT-verkkoa käyttäväksi voisi hyödyntää sairauden hoitoa, kun hoitava taho saisi reaaliaikaista tietoa mittausjärjestelmältä ja voisi toimia ennakoivasti.

Koska työssä toteutetun kaltaisia kannettavia laitteita ei vielä ole markkinoilla, olisi hyvä selvittää, millaiseksi kysyntä tuotteistetuille mittajärjestelmälle muodostuisi. Saatavilla on kuitenkin useita muita kuluttajille tuttuja terveysteknologisia sovelluksia, joten on mahdollista, että myös nestetasapainon mittaussovellus löytäisi oman käyttäjäsegmenttiinsä.

7 YHTEENVETO

Diplomityön tavoitteena oli suunnitella ja toteuttaa RF-mittausjärjestelmän integrointi kannettavaksi laitteeksi kehon nestetasapainon mittausta varten. Mittausjärjestelmä perustui Oulun yliopiston Mikroelektronikan tutkimusyksikössä suunniteltuun ja valmistettuun 4,6 GHz ... 6,8 GHz taajuusalueella käytettävään complementary split ring –tyyppiseen resonaattoriin. Aiemmassa vaiheessa erilliskomponenteilla toteutettuun mittalaitteeseen komponenteiksi oli valittu D/A-muunnin DAC5571, operaatiovahvistin, jänniteohjattu oskillaattori HMC431LP4E, suuntakytkin FPC06073 ja ilmaisimien AD8318.

Työn aluksi määriteltiin vaatimukset suunniteltavalle prototyypille. Vaatimuksissa otettiin huomioon ranteessa pidettävän laitteen fyysinen koko ja paino. Laitteen tehrolähteeksi valittiin kevyt 3,7 V Li-Ion tai Li-Po –akku ja suunniteltiin akkulaturi piirilevyille. Piirilevyille suunniteltiin jännitelähteet eri käyttöjännitteille, joita olivat 3,3 V, 5 V ja 12 V. Jännitelähdepiirien lisäksi tarvittavat komponentit valittiin datalehtien referenssikytkentöjen perusteella. Mikrokontrolleriksi valittiin CC2640R2F, jossa on tuki Bluetooth Low Energy –protokollalle ja I²C-väylälle, jota tarvittiin D/A-muuntimen ohjaukseen. Lisäksi TI:n SDK:ssa on valmiit ajurit BLE:n käyttöön ja A/D-muunnosten suorittamiseen.

Tiedonsiirtoa varten piirilevyille lisättiin invertoitu F-antenni piirilevyn kuparointiin integroituna. Antenni sovitettiin mikrokontrollerin lähtöön valmistajan esimerkeissä kuvaillulla PI-verkolla. Toinen, piirilevyllä tilaa säästävä vaihtoehto olisi ollut käyttää sovitukseen balun-komponenttia, mutta niiden toimitusaika olisi ollut useampia kuukausia huonon varastotilanteen vuoksi.

Piirilevysuunnittelussa työkaluna käytettiin Autodesk Eagle –ohjelmaa, jossa piirikaavio piirrettiin moduuleittain. Suunnittelussa hyödynnettiin mahdollisuuksien mukaan valmiita komponenttikirjastoista löytyviä symboleita, mutta suuntakytkimelle sellainen päästiin tekemään itse. Mikrokontrollerille lähtösignaaleiksi kytkettiin led merkkivaloksi, I²C-väylä ja mittauksen sallinta, joka ohjaa samalla 5 V ja 12 V jännitelähteitä. Tulosignaaleiksi kytkettiin ilmaisimen lähtöjännite, ilmaisimen lämpötilajännite, akkujännite jännitejakajan kautta sekä painonappi. Lisäksi mikrokontrollerille kytkettiin JTAG-liitin.

Piirilevyä piirrettäessä otettiin huomioon RF-komponentit ja niiden sijoittelu. RF-komponentit sijoitettiin piirilevyn alaosaan etäälle muista komponenteista ja jännitelähteistä. Erityisesti RF-komponenttien välittömään läheisyyteen piirrettiin läpivientejä häiriösignaalien kytkemiseksi maatasoon. Piirilevyn johtimet piirrettiin käsin käyttämättä automaattista reititystyökalua. Piirilevystä muodostettiin Eaglen työkaluilla Gerber-tiedostot ja komponenttiluettelo tuotantoa varten.

Ennen laiteohjelmiston suunnittelua tehtiin testaussuunnitelma, jonka mukaan tuotannosta tulleet piirilevyt testattiin. Laiteohjelmistolle tehtiin vaatimusmäärittely, jonka perusteella ohjelma toteutettiin. Ohjelman rakentamisessa käytettiin TI:n Code Composer Studio -kehitysympäristöä. Laiteohjelmiston pohjana käytettiin Project Zero –esimerkkiohjelmaa, jota muokattiin tarpeen mukaan. Ohjelmaan lisättiin funktiot oskillaattorin ohjaukseen ja mittaustulosten lukemiseen A/D-muuntimia käyttämällä.

Bluetooth-tiedonsiirtoa varten A/D-muunnoksesta tulevalle mikrovolttilukemalle tehtiin oma tietorakenne ja algoritmi, jotta alun perin 32-bittiset arvot saatiin siirrettyä 8-bittisinä tavuina. Mittaustulokset saatiin näkymään ja mittaus käynnistettyä Bluetoothin kautta. Mittaustuloksissa havaittiin heijastuvan tehon alenemaa vastaavilla taajuusalueilla kuin aiemmin laboratorioympäristössä, vaikka yhtä jyrkkää piikkiä resonanssiaajuuden kohdalla ei saatu toistettua.

Kehitysprosessin aikana havaittiin joitain suunnitteluvirheitä, jotka kyettiin korjaamaan tai jotka eivät vaikuttaneet laitteen toimintaan. D/A-muuntimen käyttöjännite oli muutettava 5 V:sta 3,3 V:iin ja sen lähtöä vahvistavan operaatiovahvistimen takaisinkytkentävastusta oli pienennettävä vastaavasti. Mikrokontrollerille oli lisättävä 24 MHz kide Bluetooth-yhteyttä varten käsin juottamalla 0,1 mm jalkoihin.

Lopuksi todettiin, että jatkokehityksessä voidaan toteuttaa mobiilisovellus, joka lukee ja analysoi mittalaitteen lähettämiä arvoja. Mobiilisovelluksen avulla mittausjärjestelmä voi oppia tulkitsemaan käyttäjän yksilöllisiä mittausarvoja ja mahdollisesti lähettää ne eteenpäin verkkopalveluun tai terveydenhuoltoon.

8 LÄHDELUETTELO

- [1] Kilpijärvi J., Tolvanen J., Juuti J., Halonen N. & Hannu J. (2020) A Non-Invasive Method for Hydration Status Measurement With a Microwave Sensor Using Skin Phantoms. *IEEE Sensors Journal*, Vol. 20, No. 2, s. 1095-1104.
- [2] Duodecim Terveyskirjasto. (Luettu 21.3.2021) Lääketieteen sanasto. Dehydraatio. <https://www.terveyskirjasto.fi/ltt00505/dehydraatio>
- [3] Fahey T. D., Insel P. M. & Roth T. W. (2005) *Fit & Well. Core Concepts and Labs in Physical Fitness and Wellness*. McGraw-Hill, 430 s.
- [4] HealthNetCafe (Luettu 31.5.2021) Day-to-Day Care. Observation: Fluid Balance. http://www.healthnetcafe.com/content/day-to-day_care/observation/fluid_balance.html
- [5] Nyfors E. & Vainikainen P. (1989) *Industrial Microwave Sensors*. Artech House, Norwood.
- [6] Texas Instruments. (Luettu 8.10.2020) CC2640R2F. SimpleLink™ Bluetooth® 5.1 Low Energy Wireless MCU. <https://www.ti.com/lit/gpn/cc2640r2f>
- [7] Texas Instruments. (Luettu 21.3.2021) TI-RTOS: Real-Time Operating System (RTOS) for Microcontrollers (MCU) <https://www.ti.com/tool/TI-RTOS-MCU>
- [8] Cellevia Batteries. (Luettu 21.9.2020) Specification Approval Sheet. <https://www.tme.eu/Document/89b65ec6de44062e426f7190968d7279/cel0066.pdf>
- [9] Micrel. (Luettu 8.10.2020) MIC23050. 4MHz PWM Buck Regulator with HyperLight Load™ Switching Scheme. <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/mic23050.pdf>
- [10] Microchip. (Luettu 18.10.2020) MCP73831/2. Miniature Single-Cell, Fully Integrated Li-Ion, Li-Polymer Charge Management Controllers. <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/22036b.pdf>
- [11] Analog Devices. (Luettu 12.10.2020) HMC431LP4/431LP4E. MMIC VCO w/buffer amplifier, 5.5–6.1 GHz. <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/hmc431.pdf>
- [12] ON Semiconductor. (Luettu 12.10.2020) Using MOSFETs in Load Switch Applications. <https://www.onsemi.cn/pub/Collateral/AND9093-D.PDF>
- [13] Diodes Incorporated. (Luettu 12.10.2020) DMG1012UW. N-Channel Enhancement Mode Mosfet. <https://www.diodes.com/assets/Datasheets/ds31859.pdf>
- [14] ON Semiconductor. (Luettu 12.10.2020) NDS332P. P-Channel Logic Level Enhancement Mode Field Effect Transistor. <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/nds332p-d.pdf>
- [15] Texas Instruments. (Luettu 14.10.2020) TPS6124x 3.5-MHz High Efficiency Step-Up Converter. <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps61241.pdf>
- [16] Texas Instruments. (Luettu 14.10.2020) LM4510 Synchronous Step-Up DC/DC Converter with True Shutdown Isolation. <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm4510.pdf>
- [17] ST Microelectronics. (Luettu 9.10.2020) Development of RF hardware using STM32WB microcontrollers. https://www.st.com/resource/en/application_note/dm00504903-development-of-rf-hardware-using-stm32wb-microcontrollers-stmicroelectronics.pdf
- [18] Texas Instruments. (Luettu 16.10.2020) Design Guide: TIDA-01624. Bluetooth® - Enabled, High-Accuracy Skin Temperature Measurement Flex PCB Patch Reference Design. <https://www.ti.com/lit/ug/tidudw4a/tidudw4a.pdf>

- [19] Texas Instruments. (Luettu 16.10.2020) Johanson Balun for the CC26xx Device Family <https://www.ti.com/lit/an/swra572/swra572.pdf>
- [20] Texas Instruments. (Luettu 16.10.2020) CC2650EM-7ID Reference Design. <https://www.ti.com/tool/CC2650EM-7ID-RD>
- [21] Kingbright. (Luettu 25.10.2020) APG1608SURKC/T. 1.6 x 0.8 x 0.25 mm (0603) SMD Chip LED Lamp. <https://www.kingbrightusa.com/images/catalog/SPEC/APG1608SURKC-T.pdf>
- [22] Autodesk Eagle. (Luettu 2.10.2020) <https://www.autodesk.com/products/eagle/free-download>
- [23] SamacSys Ltd. (Luettu 13.10.2020) Electronic Component Search Engine. <https://www.componentsearchengine.com>
- [24] ElectronicsNotes. (Luettu 25.10.2020) SMT / SMD Components & packages, sizes, dimensions, details. https://www.electronics-notes.com/articles/electronic_components/surface-mount-technology-smd-smt/packages.php
- [25] Texas Instruments. (Luettu 30.10.2020) 2.4-GHz Inverted F Antenna. <https://www.ti.com/lit/an/swru120d/swru120d.pdf>
- [26] Analog Devices. (Luettu 5.10.2020) AD8318. 1 MHz to 8 GHz, 70 dB Logarithmic Detector/Controller <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8318.pdf>
- [27] Ucamco. (Luettu 7.4.2021) Gerber format <https://www.ucamco.com/en/gerber>
- [28] Altium. (Luettu 15.1.2021) Checklist for Systematically Testing PCB Prototypes. <https://resources.altium.com/p/checklist-systematically-testing-pcb-prototypes>
- [29] Texas Instruments. (Luettu 12.10.2020) +2.7 V to + 5,5 V, I²C Interface, Voltage Output, 8-bit Digital-to-Analog Converter. <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/dac5571.pdf>
- [30] Texas Instruments. (Luettu 12.1.2021) Code Composer Studio™ integrated development environment (IDE). <https://www.ti.com/tool/CCSTUDIO>
- [31] XJTAG. (Luettu 8.5.2021) What is JTAG and how can I make use of it? <https://www.xjtag.com/about-jtag/what-is-jtag/>
- [32] Texas Instruments. (Luettu 11.2.2021) XDS100. <https://software-dl.ti.com/ccs/esd/documents/xdsdebugprobes/files/XDS100.pdf>
- [33] Olimex. (Luettu 18.11.2021) TMS320-XDS100-V3. <https://www.olimex.com/Products/DSP/Emulators/TMS320-XDS100-V3/>
- [34] Texas Instruments. (Luettu 8.11.2020) SimpleLink™ CC2640R2 SDK BLE5-Stack User's Guide. Using 32-kHz Crystal-Less Mode. https://dev.ti.com/tirex/explore/content/simplelink_cc2640r2_sdk_4_10_00_10/docs/ble5stack/ble_user_guide/html/ble-stack-5.x/custom-hardware-cc2640.html#using-32-khz-crystal-less-mode
- [35] Bluetooth SIG. (Luettu 14.5.2021) Bluetooth Radio Versions. <https://www.bluetooth.com/learn-about-bluetooth/radio-versions/>
- [36] Hughes J. M. (2016) Arduino: A Technical Reference: A Handbook for Technicians, Engineers and Makers. O'Reilly Media, Sebastopol, 632 s.

9 LIITELUETTELO

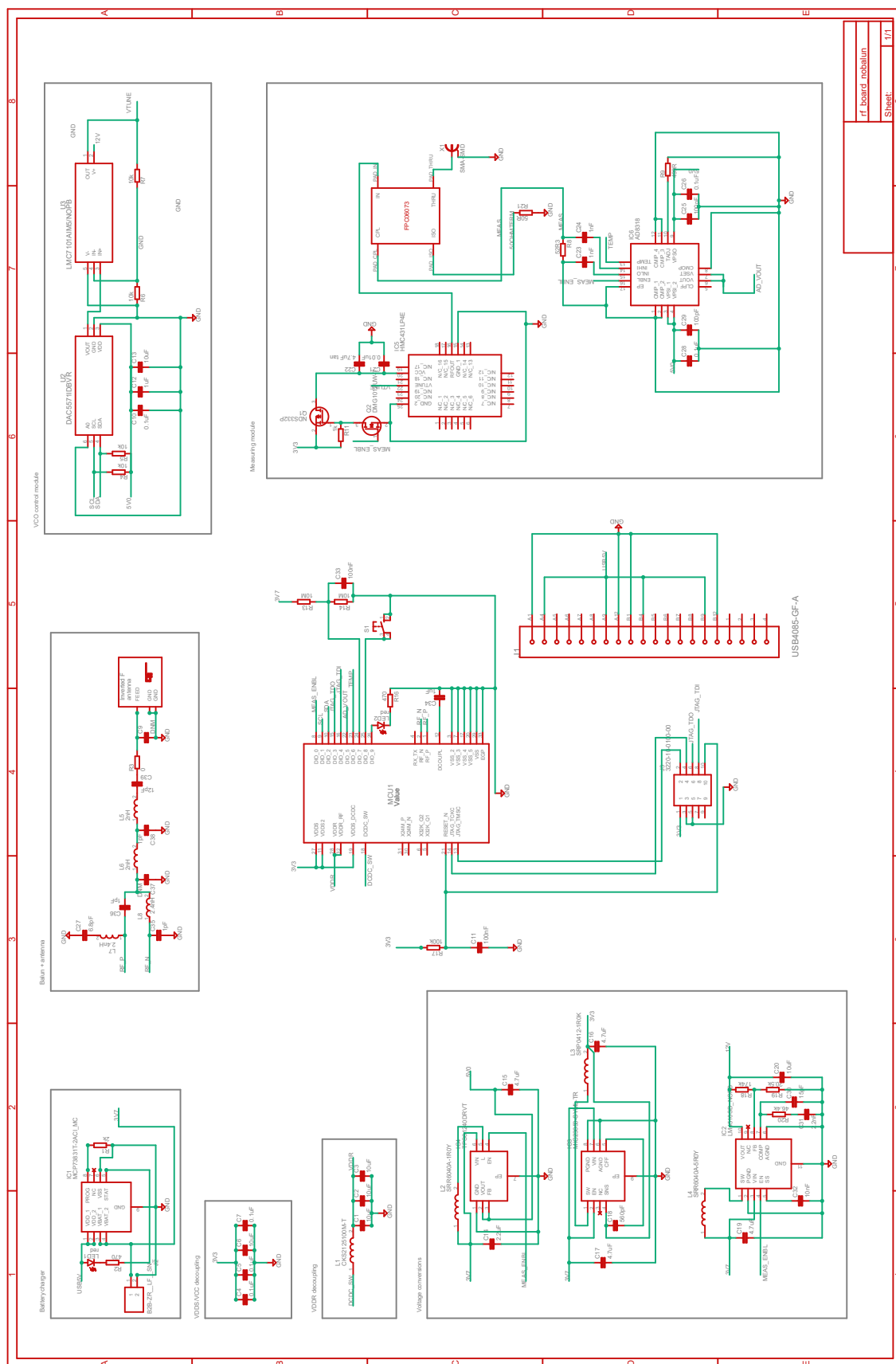
Liite 1 Prototyypin piirikaavio

Liite 2 Prototyypin piirilevypiirros

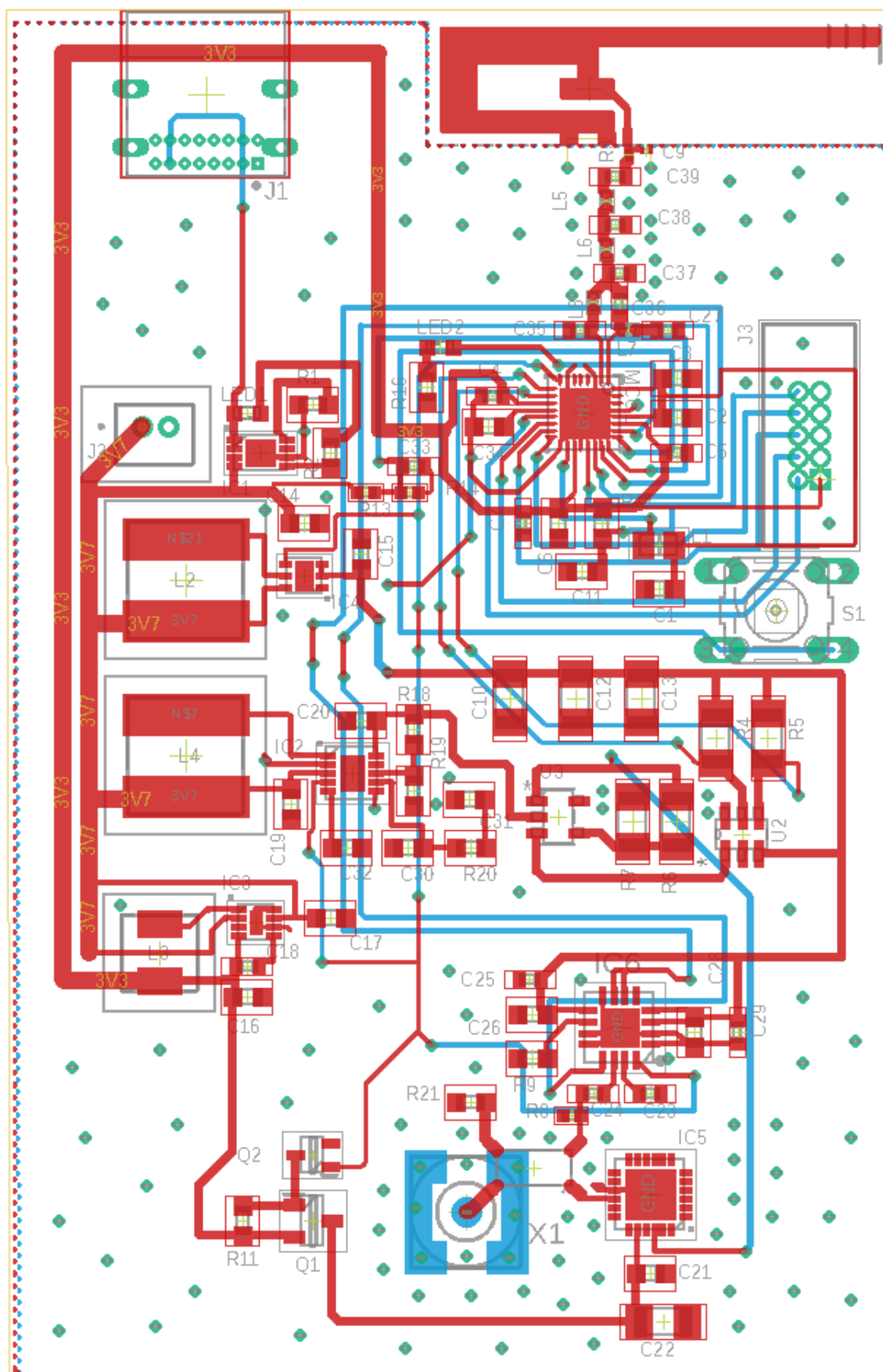
Liite 3 Prototyypin komponenttiluettelo

Liite 4 Valmistettu piirilevy

Liite 1 Prototyypin piirikaavio



Liite 2 Prototyypin piirilevykuva



Liite 3 Komponenttiluettelo

Item #	*Designator	*Qty	Manufacturer	*Mfg Part #	Description / Value	*Package/Footprint	Type
1	S1	1	Omron	B3F-1000	SWITCH TACTILE SPST-NO 0.05A 24V	4POS	Thru-hole
2	R3	1	Yaego	RC0201JR-070RL	RES SMD 0 OHM JUMPER 1/20W 0201	R0201	SMD
3	C21, C32	2		06035C103JAT2A	CAP CER 10000PF 50V X7R 0603	C0603	SMD
4	C4, C5, C7, C18, C33	5		04023C104JAT2A	CAP CER 0.1UF 25V X7R 0402	C0402	SMD
5	C11, C26, C28	3		06033C104KAT4A	CAP CER 0.1UF 25V X7R 0603	C0603	SMD
6	C10	1		12063C104JAT2A	CAP CER 0.1UF 25V X7R 1206	C1206	SMD
7	R17	1		RCA0603100KFKEA	RES SMD 100K OHM 1% 1/10W 0603	R0603	SMD
8	C25, C29	2		C0402C101J5GACTU	CAP CER 100PF 50V COG/NP0 0402	C0402	SMD
9	R13, R14	2		CRCW040210M0FKED	RES SMD 10M OHM 1% 1/16W 0402	R0402	SMD
10	R4, R5, R6, R7	4		CRCW120610K0FKEA	RES SMD 10K OHM 1% 1/4W 1206	R1206	SMD
11	C1, C2, C3, C6, C20	5		TMK107BBJ106MA-T	CAP CER 10UF 25V X5R 0603	C0603	SMD
12	C13	1		C1206C106J3RACAUTO	CAP CER 10UF 25V X7R 1206	C1206	SMD
13	C30	1		06033A150JAT2A	CAP CER 15PF 25V COG/NP0 0603	C0603	SMD
14	R18	1		CRCW0603174KFKEA	RES SMD 174K OHM 1% 1/10W 0603	R0603	SMD
15	R11	1		CRCW06031K00FKEA	RES SMD 1K OHM 1% 1/10W 0603	R0603	SMD
16	C23, C24	2		04025C102JAT2A	CAP CER 1000PF 50V X7R 0402	C0402	SMD
17	C34	1		06033D105KAT2A	CAP CER 1UF 25V X5R 0603	C0603	SMD
18	C12	1		12065C105JAT2A	CAP CER 1UF 50V X7R 1206	C1206	SMD
19	C31	1		06033C222KAT2A	CAP CER 2200PF 25V X7R 0603	C0603	SMD
20	C14	1		TMK107ABJ225KA-T	CAP CER 2.2UF 25V X5R 0603	C0603	SMD
21	R19	1		CRCW060320K5FKEA	RES SMD 20.5K OHM 1% 1/10W 0603	R0603	SMD
22	R1	1		CRCW06032K00FKEA	RES SMD 2K OHM 1% 1/10W 0603	R0603	SMD
23	J3	1	CNC Tech	3220-10-0100-00	CONN HEADER VERT 10POS 1.27MM	10POS	Thru-hole
24	C15, C16, C17, C19	4		TMK107BBJ475KA-T	CAP CER 4.7UF 25V X5R 0603	C0603	SMD
25	C22	1		F931C475KAA	CAP TANT 4.7UF 10% 16V 1206	C1206	SMD
26	R20	1		RMCF0603FT46K4	RES 46.4K OHM 1% 1/10W 0603	R0603	SMD
27	R2, R16	2		CRCW0603470RFKEA	RES SMD 470 OHM 1% 1/10W 0603	R0603	SMD
28	R9	1		CRCW0603499RFKEA	RES SMD 499 OHM 1% 1/10W 0603	R0603	SMD
29	R21	1		CRCW060350R0FKEA	RES SMD 50 OHM 1% 1/10W 0603	R0603	SMD
30	R8	1		RP73PF1E52R3BTD	RES 52.3 OHM 0.1% 1/10W 0402	R0402	SMD
31	IC6	1	Analog Devices	AD8318ACPZ-REEL7	IC RF DETECT 1MHZ-8GHZ 16LFCSP	16-LFCSP	SMD
32	J2	1	JST	B2B-ZR(LF)(SN)	JST ZH CONN HEADER VERT 2POS 1.5MM	2POS	Thru-hole
33	L1	1	Taiyo Yuden	CKS2125100M-T	FIXED IND 10UH 110MA 520 MOHM	SMD	SMD
34	U2	1	TI	DAC5571IDBVR	IC DAC 8BIT V-OUT SOT23-6	SOT23-6	SMD
35	Q2	1	Diodes Inc	DMG1012UW-7	MOSFET N-CH 20V 1A SOT323	SOT323	SMD
36	C9	1		n/a	CAPACITOR, European symbol	C0201	DNM
37	RF1	1	Knowles Dielectric Labs	FPC06073	RF DIR COUPLER 4GHZ-8GHZ SMD	SMD	SMD
38	IC5	1	Analog Devices	HMC431LP4E	IC MMIC VCO W/BUFF AMP 4X4QFN	QFN	SMD
39	IC2	1	TI	LM4510SD/NOPB	IC REG BOOST ADJ 1A 10WSON	SON	SMD
40	U3	1	TI	LMC7101AIM5/NOPB	IC OPAMP GP 1 CIRCUIT SOT23-5	SOT23-5	SMD
41	IC1	1	Microchip	MCP73831T-2ACI/MC	IC CONTROLLER LI-ION 4.2V 8DFN	DFN	SMD
42	IC3	1	Microchip	MIC23050-SYML-TR	IC REG BUCK 3.3V 600MA 8MLF	MLF	SMD
43	Q1	1	ON	NDS332P	MOSFET P-CH 20V 1A SUPERSOT3	SUPERSOT3	SMD
44	X1	1	Molex	732511350	CONN SMA JACK STR 50 OHM SMD	SMD	SMD
45	L3	1	Bourns	SRP0412-4R7K	FIXED IND 4.7UH 2.6A 128 MOHM	SMD	SMD
46	L2	1	Bourns	SRR6040A-1R0Y	FIXED IND 1UH 5A 15 MOHM SMD	SMD	SMD
47	L4	1	Bourns	SRR6040A-5R0Y	FIXED IND 5UH 2.9A 25 MOHM SMD	SMD	SMD
48	IC4	1	TI	TPS61240DRVT	IC REG BOOST 5V 500MA 6SON	SON	SMD
49	J1	1	GCT	USB4110-GF-A	CONN USB 2.0 TYPE-C R/A SMT	SMT	SMD
50	MCU1	1	TI	CC2640R2FRSMR	IC RF TXRX+MCU BLUETOOTH 32VFQFN	VFQFN	SMD
51	LED1, LED2	2	Kingbright	APG1608SURKC/T	LED RED CLEAR CHIP SMD	SML0603	SMD
52	C36, C37, C38	3	Murata	GRM1555C1H1R0CA01D	CAPACITOR, CERAMIC COG/NP0, 1pF, 50V, C0402	C0402	SMD
53	C39	1	Murata	GRM1555C1H120JA01D	CAPACITOR, CERAMIC COG/NP0, 12pF, 50V C0402	C0402	SMD
54	C27	1	Murata	GRM1555C1H6R8DZ01J	CAPACITOR, CERAMIC COG/NP0, 6.8pF, 50V C0402	C0402	SMD
55	L7, L8	2	Murata	LQG15HN2N4S02D	INDUCTOR, CHIP, 2.4nH, -0.3nH/+0.3nH, 0402	0402	SMD
56	L5, L6	2	Murata	LQG15HS2N0S02D	INDUCTOR, CHIP, 2nH, -0.3nH/+0.3nH, 0402	0402	SMD

Liite 4 Valmistettu piirilevy

